

# Utjecaj visokobrzinske obrade na dinamiku bušenja medicinskim svrdlom

---

Žižak, Tea

Master's thesis / Diplomski rad

2018

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:541748>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-04**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Tea Žižak**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Tomislav Staroveški, dipl. ing.

Student:

Tea Žižak

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Tomislavu Staroveškom na pomoći pri izradi ovog Diplomskog rada. Zahvaljujem se i asistentu Mihi Klaiću, mag. ing., i prof. dr. sc. Danku Brezaku na pristupačnosti i pomoći koju su mi pružili nizom korisnih savjeta te djelatnicima Katedre za alatne strojeve na pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Na kraju bih se zahvalila svojim roditeljima što su mi omogućili studiranje te Antoniju i prijateljima što su me podržavali na svakom koraku studiranja.

Tea Žižak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **TEA ŽIŽAK** Mat. br.: **0035195368**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj visokobrzinske obrade na dinamiku bušenja medicinskim svrdlom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of high speed cutting on bone drilling process**

Opis zadatka:

Parametri obrade i stupanj istrošenosti medicinskog svrdla značajno utječu na sile rezanja i razvoj topline u zoni bušenja, što u konačnici može rezultirati s ozbiljnim i ireverzibilnim posljedicama na biomehaničke karakteristike kosti u području zahvata. Do sada je objavljen niz istraživanja u kojima je razmatran utjecaj predmetnih parametara na dinamiku bušenja medicinskim svrdlom. Međutim, u većini slučajeva nisu razmatrani parametri iz područja visokobrzinske obrade, kao ni njihov utjecaj na dinamiku trošenja medicinskog svrdla. Stoga je u radu potrebno:

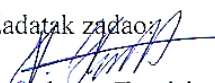
1. Dati kratak pregled istraživanja iz područja bušenja medicinskim svrdlom.
2. Izvršiti eksperimentalnu analizu utjecaja visokobrzinske obrade na dinamiku trošenja medicinskog svrdla, zagrijavanje ispitnog uzorka i sile rezanja.
3. Komentirati dobivene rezultate.
4. Dati zaključke rada.

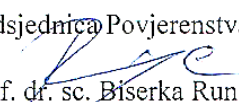
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:  
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:  
11. srpnja 2018.  
12. srpnja 2018.  
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:  
  
doc. dr. sc. Tomislav Staroveški

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
POPIS KRATICA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Svojstva kosti .....	2
1.2. Termička osteonekroza .....	3
1.3. Motivacija i cilj rada .....	5
2. POSTUPAK OBRADJE BUŠENJEM .....	6
2.1. Parametri bušenja .....	7
2.2. Alat za bušenje .....	9
2.3. Svrđlo u kirurgiji.....	10
2.4. Sile rezanja kod bušenja.....	13
2.5. Trošenje alata kod bušenja .....	14
3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA .....	16
3.1. Utjecaj parametara bušenja na povećanje temperature .....	17
3.2. Utjecaj konstrukcije alata na povećanje temperature.....	18
3.3. Utjecaj trošenja oštrice alata na povećanje temperature .....	19
3.4. Utjecaj visokobrzinske obrade na povećanje temperature .....	20
3.5. Utjecaj rashladnog sredstva na povećanje temperature .....	22
3.6. Predloženi matematički modeli procesa bušenja .....	24
4. EKSPERIMENTALNI POSTAV I MJERNA OPREMA.....	27
4.1. Ispitni stroj .....	28
4.2. Ispitni uzorak.....	31
4.3. Ispitna svrdla.....	32
4.4. Mjerni sustavi.....	33
4.4.1. Mjerna stanica .....	33

---

4.4.2. Senzor za temperaturu.....	34
4.4.3. Senzor sila.....	35
4.4.4. Industrijska kamera.....	36
4.5. Programska podrška mjernog sustava.....	37
5. MJERENJA I REZULTATI.....	40
5.1. Plan pokusa.....	41
5.1.1. Svrđlo broj 1.....	42
5.1.2. Svrđlo broj 2.....	46
5.1.3. Svrđlo broj 3.....	47
5.2. Rezultati pokusa.....	48
5.2.1. Trošenje oštrice alata.....	48
5.2.2. Temperatura.....	53
5.2.3. Sile rezanja.....	55
6. ZAKLJUČAK.....	57
LITERATURA.....	58
PRILOZI.....	61

**POPIS SLIKA**

Slika 1.1	Struktura koštanog tkiva [1].....	2
Slika 1.2	Primjer zbrinjavanja prijeloma osteosintezom (lijevo) i kost oštećena termičkom osteonekrozom (desno) [7].....	3
Slika 2.1	Postupak bušenja s označenim posmičnim (P) i glavnim (G) gibanjem [13].....	6
Slika 2.2	Shematski prikaz parametara bušenja [15] .....	7
Slika 2.3	Bušenje a) prolaznog i b) neprolaznog provrta spiralnim svrdlom [15].....	9
Slika 2.4	Standardno spiralno svrdlo primijenjeno u kirurgiji [1] .....	10
Slika 2.5	Geometrija spiralnog svrdla [1] .....	11
Slika 2.6	Shematski prikaz procesa odvajanja čestica kod bušenja [1] .....	11
Slika 2.7	Sile rezanja kod bušenja [1].....	13
Slika 2.8	Tipaska krivulja trošenja reznih alata [17] .....	14
Slika 2.9	Trošenje stražnje površine svrdla [17].....	15
Slika 3.1	Usporedba konstrukcije svrdla [19] .....	18
Slika 3.2	Dijagram temperatura – frekvencija vrtnje za promjer svrdla 4,8 mm (lijevo) i 2,5 mm (desno) pri 50 mm/min [4] .....	19
Slika 3.3	Dijagram temperatura – posmak za promjer svrdla 4,8 mm (lijevo) i 2,5 mm (desno) pri 2000 okr/min [4] .....	19
Slika 3.4	Utjecaj frekvencije vrtnje na povećanje temperature [11].....	20
Slika 3.5	Svrdlo s kanalima za SHIP [20].....	22
Slika 3.6	Shematski prikaz prijenosa topline kod bušenja: a) bez hlađenja, b) uz hlađenje plinom, c) uz hlađenje tekućinom [20].....	23
Slika 3.7	a) Usporedba temperature kosti dobivenih metodom konačnih elemenata (MKE) i eksperimentom; b) Razlika temperature za Sawbones blok i svinjsku kost [5]....	26
Slika 4.1	Ispitni postav .....	27
Slika 4.2	Ispitni stroj .....	28
Slika 4.3	Sinkroni servo motor APMSB04ADK i njegova pripadajuća karakteristika [1].....	30
Slika 4.4	Naručeni ispitni uzorak [24] .....	31
Slika 4.5	Synthes svrdlo 310.450 .....	32
Slika 4.6	Svrdlo prilagođeno eksperimentu .....	32
Slika 4.7	Shematski prikaz eksperimentalnog postava [1].....	33



---

Slika 4.8 Mjerna stanica NI cDAQ-9178 [1] .....	34
Slika 4.9 Senzor za mjerenje temperature [1] .....	34
Slika 4.10 Položaj termopara tijekom bušenja [21] .....	35
Slika 4.11 Senzor sila (tip 9257B) s nabojnim pojačalom 5017B [1].....	35
Slika 4.12 Industrijska kamera DMK41AF02 a) s objektivom TC2309 b) [1].....	36
Slika 4.13 Industrijska kamera i svrdlo u poziciji za slikanje oštrice .....	36
Slika 4.14 Korisničko sučelje mjerne aplikacije .....	37
Slika 4.15 Primjer mjerne datoteke nastale jednim ciklusom mjerenja .....	38
Slika 4.16 Primjer oznake jedne (1/8) slike svrdla nastale jednim ciklusom slikanja .....	38
Slika 5.1 Slikanje oštrice.....	41
Slika 5.2 Dijagram toka izvođenja bušenja prvim svrdlom .....	43
Slika 5.3 Određivanje parametara za trošenje oštrice alata.....	48
Slika 5.4 Maksimalna širina trošenja stražnje površine oštrice .....	49
Slika 5.5 Srednja širina trošenja stražnje površine oštrice .....	50
Slika 5.6 Površina trošenja stražnje površine oštrice .....	50
Slika 5.7 Dijagram temperatura – maksimalna širina trošenja stražnje površine .....	54
Slika 5.8 Dijagram rezultatna sila – maksimalna širina trošenja stražnje površine .....	56

## POPIS TABLICA

Tablica 4.1 Osnovne tehničke karakteristike ispitnog stroja [1].....	29
Tablica 4.2 Osnovni tehnički podaci motora [1].....	30
Tablica 4.3 Karakteristike ispitnog uzorka [24].....	31
Tablica 4.4 Primjer nastalih slika jedne oštrice jednim ciklusom slikanja .....	39
Tablica 5.1 Postupak bušenja prvim svrdlom .....	44
Tablica 5.2 Slike oštrica svrdla 1 nakon određenog broj izbušenih provrta .....	45
Tablica 5.3 Slike oštrica svrdla 2 nakon određenog broj izbušenih provrta .....	46
Tablica 5.4 Slike oštrica svrdla 3 nakon određenog broj izbušenih provrta .....	47
Tablica 5.5 Područja maksimalne širine trošenja stražnje površine svrdla broj 1 s obzirom na stupanj istrošenosti .....	51
Tablica 5.6 Početni i konačni oblik trošenja prema stupnju istrošenosti .....	52
Tablica 5.7 Maksimalne, minimalne i prosječne vrijednosti temperatura podijeljene prema stupnju istrošenosti .....	53
Tablica 5.8 Maksimalne, minimalne i prosječne vrijednosti maksimalnih rezultantnih sila podijeljene prema stupnju istrošenosti .....	55

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$2\varphi$	°	Vršni kut svrdla
$a_p$	Mm	Dubina rezanja
$d$ ili $d_1$	Mm	Promjer svrdla
$d_c$	Mm	Promjer jezgre
$f$	mm/okr	Posmak
$F_a$	N	Aksijalna sila bušenja
$F_c$	N	Glavna sila rezanja
$F_{cp}$	N	Glavna sila rezanja poprečne oštrice
$F_f$	N	Posmična sila
$F_{fp}$	N	Posmična sila poprečne oštrice
$F_p$	N	Natražna sila (pasivna sila)
$F_R$	N	Rezultantna sila
$F_t$	N	Sila trenja
$F_x$	N	Sila rezanja u smjeru X osi
$F_y$	N	Sila rezanja u smjeru Y osi
$f_z$	mm/okr	Posmak za jednu oštricu
$F_z$	N	Sila rezanja u smjeru Z osi
$n$	okr/min	Učestalost vrtnje (frekvencija vrtnje ili broj okretaja) svrdla
$VB$	Mm	Širina trošenja stražnje površine alata
$VB_{MAX}$	Mm	Maksimalna vrijednost širine trošenja stražnje površine
$VB_S$	mm <sup>2</sup>	Površina trošenja stražnje površine alata
$VB_{SR}$	Mm	Srednja vrijednost širine trošenja
$v_c$	m/min	Brzina rezanja
$v_f$	mm/min	Posmična brzina
$w_f$	Mm	Širina faze
$w_h$	Mm	Visina faze
$z$	-	Broj oštrica
$\alpha$	°	Kut stražnje površine
$\beta$	°	Kut klina (kut oštrenja)
$\gamma$	°	Kut prednje površine
$\vartheta$	°C	Temperatura
$\omega_s$	°	Kut spiralnog žlijeba

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
CAN	CAN sabirnica ( <i>Controller Area Network</i> )
CATIA	Interaktivni programski paket za trodimenzionalno konstruiranje i proizvodnju podržanu računalom ( <i>Computer Aided Three-dimensional Interactive Application</i> )
CNC	Računalno numeričko upravljanje ( <i>Computer Numerical Control</i> )
G	Glavno gibanje
MKE	Metoda konačnih elemenata
NC	Numeričko upravljanje ( <i>Numerical Control</i> )
P	Posmično gibanje
SD	Oštro svrdlo ( <i>Sharp Drill</i> )
SHIP	Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje
WD	Istrošeno svrdlo ( <i>Worn Drill</i> )
GV	Glavno vreteno

## SAŽETAK

Bušenje kosti je čest postupak u koštano zglobnoj kirurgiji koji se koristi kod sanacije prijeloma kosti. Uspjeh ovog kirurškog postupka ovisi o puno čimbenika, a većim dijelom o stvaranju topline tijekom procesa. Do sada je objavljen niz istraživanja u kojima je razmatran utjecaj mnoštva parametara na dinamiku bušenja medicinskim svrdlom i njihov je pregled dan u prvom dijelu rada. Međutim, u većini slučajeva nisu razmatrani parametri iz područja visokobrzinske obrade, kao ni njihov utjecaj na dinamiku trošenja medicinskog svrdla. Stoga je u drugom dijelu radu napravljen eksperiment u kojem su razmatrani utjecaji visokobrzinskih i niskobrzinskih parametara obrade te dinamike trošenja alata na sile rezanja i temperaturu bušenja. Rezultati pokazuju da se visokobrzinskim parametrima obrade mogu ostvariti niže temperature bušenja u odnosu na niskobrzinske.

Ključne riječi: bušenje kosti, termička osteonekroza, visokobrzinska obrada

## **SUMMARY**

Bone drilling is a common procedure in traumatology and orthopedics. Success of this surgical procedure depends on a lot of factors, with one of the most important being heat generation during drilling. So far, a number of papers have been published in which the effects of different parameters on drilling process have been investigated. A brief overview of the published studies is provided in the first part of this paper. However, very few studies investigated the effects of high-speed machining on drilling temperature and drill wear. Hence, the second part of this paper investigates the influence of tool wear, with two different cutting parameters (conventional and high-speed), on the drilling temperatures and cutting forces. Results show that high-speed machining can achieve lower drilling temperatures compared to conventional machining.

Key words: bones drilling, thermal osteonecrosis, high-speed machining

## 1. UVOD

Zbog težnje za razvojem i unaprjeđenjem svih djelatnosti u životu ljudi, integracija različitih znanstvenih disciplina nije neuobičajena pojava. Liječnici svakodnevno pokušavaju poboljšati kvalitetu života pacijenata razvojem novih strojeva, pomagala, operativnih zahvata i lijekova. Upravo u tu svrhu postoji veza između medicine i strojarstva.

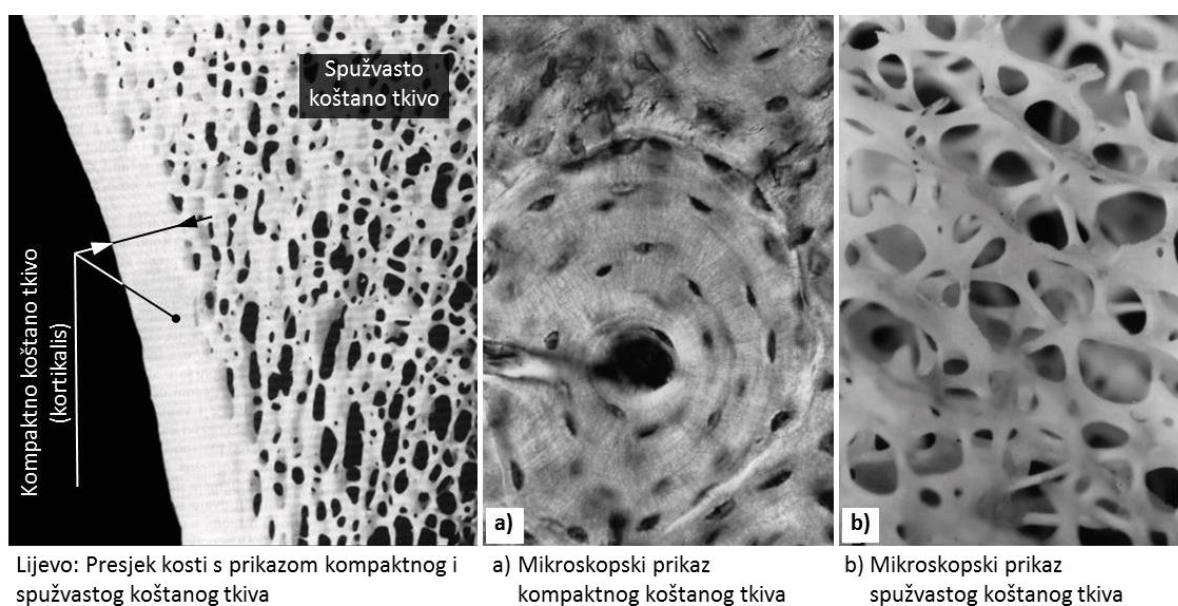
Bušenje kosti je čest postupak u medicini, najčešće u traumatologiji i ortopediji, kao priprema za zahvat sanacije prijeloma kosti i u operacijama rekonstrukcije. Uspjeh ovog kirurškog postupka ovisi o puno čimbenika, a većim dijelom i o stvaranju topline uslijed bušenja. Jedan od većih problema koji se može javiti u bušenju kosti je mehaničko i termičko oštećenje kosti uzrokovano neodgovarajućim parametrima kao što su brzina rezanja i posmak te korištenjem istrošenih svrdla.

Ovaj postupak je zanimljiv i za područje strojarstva jer se tijekom operacije koriste razne pile, bušilice, dlijeta, vijci i pločice čime se oštećuje tkivo pacijenta. Još su k tome svrdla korištena u kirurgiji podložna intenzivnom trošenju oštrice uslijed mehaničkih, kemijskih i toplinskih utjecaja. Trošenje utječe na povećanje trenja između svrdla i kosti što u konačnici rezultira povećanjem temperature u zoni obrade. Dodatni problem može nastati ako dođe do loma vrha ili oštrice alata ili do potpunog loma tijela svrdla uslijed preopterećenja. Preveliko povećanje temperature unutar zone bušenja kosti može izazvati pojavu termičke osteonekroze (oštećenja koštanog tkiva) što smanjuje čvrstoću kosti u izbušenom provrtu. U tim slučajevima često dolazi do nepotpune mobilizacije kosti pa popravak prijeloma nije obavljen kako treba te se usporava cijeli postupak cijeljenja kosti.

U ovom radu istražen je utjecaj niskobrzinske i visokobrzinske obrade te utjecaj dinamike trošenja medicinskog svrdla na povećanje temperature bušenja kosti. U 2. poglavlju opisan je postupak bušenja sa svim potrebnim pojmovima za razumijevanje ovog rada. U 3. poglavlju dan je pregled dosadašnjih istraživanja, uključujući istraživanja koja se bave utjecajem raznih čimbenika na povećanje temperature pri bušenju kostiju poput parametara obrade, konstrukcije alata, trošenja oštrice alata i slično. U 4. poglavlju prikazan je korišteni eksperimentalni postav i mjerna oprema za eksperimentalni dio ovog rada. U 5. poglavlju je detaljno opisan svaki korak pokusa te su prikazani i analizirani rezultati pokusa. Na kraju, u 6. poglavlju donesen je zaključak cijelog rada.

## 1.1. Svojstva kosti

Prema [1] kost je kompleksno biološko tkivo s organskim i mineralnim fazama čije interakcije rezultiraju složenim mehaničkim i termičkim svojstvima. Strukturna građa kosti je kompozitna i sastoji se iz kolagena i hidroksiapatita. Mekši kolagen sprječava tvrdi hidroksiapatit od mrvljenja, dok hidroksiapatit istovremeno sprječava kolagen od popuštanja. Promatrana duž poprečnog presjeka (slika 1.1), struktura kosti prelazi iz vanjskog, tvrdog područja kompaktnog koštanog tkiva (korteks, kortikalis, compact, cortical bone) bez šupljina, u područje mekšeg, spužvastog tkiva s brojnim međusobno povezanim šupljinama (spongiozno tkivo, cancellous, trabecular bone).



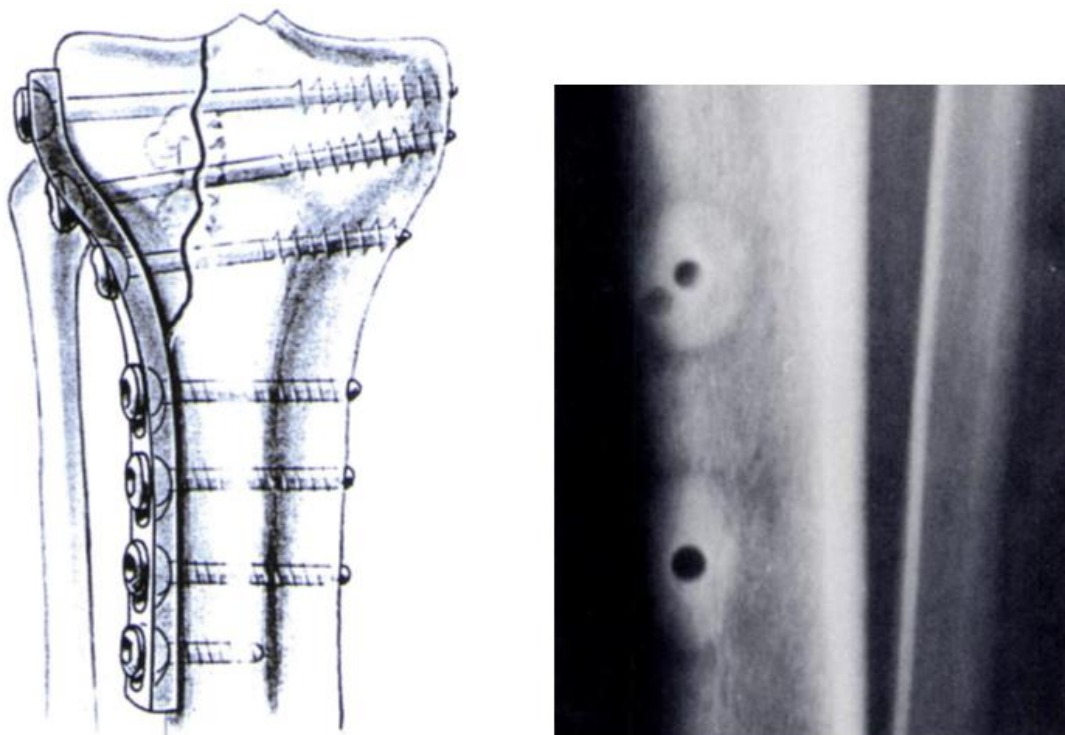
**Slika 1.1** Struktura koštanog tkiva [1]

Termička svojstva kostiju, kao i mehanizmi njihova oštećenja, za razliku od mehaničkih svojstava, još uvijek nisu detaljno istražena. Na tom se području istraživanja odvijaju u nekoliko pravaca. Proučavaju se biokemijski procesi koji nastaju u koštanom tkivu izloženom povišenim temperaturama, a analiziraju se i termodinamičke karakteristike kosti (specifični toplinski kapacitet, koeficijent toplinske vodljivosti) s obzirom na smjer, vrstu, starost, mehaničke karakteristike kosti i drugo. Pritom se došlo do oprečnih zaključaka. Iako su neka istraživanja rezultirala spoznajom o termičkoj anizotropnosti kosti [2, 3, 4, 5], što je i dalje uglavnom prihvaćeno mišljenje većine istraživača iz ovog područja, druga istraživanja ukazuju na činjenicu da je kost termički izotropna [6].



## 1.2. Termička osteonekroza

Prema [7] jedan od bitnih elemenata koji otežava i prolongira normalno cijeljenje kosti je termička nekroza kosti (termička osteonekroza). Radi se o oštećenju kosti izazvanom stvaranjem povišene temperature kosti tijekom njenog bušenja (slika 1.1). Povišena temperatura u zoni obrade može uzrokovati ireverzibilnu nekrozu kosti koja rezultira smrću koštanih stanica i nemogućnošću obnavljanja kosti čime ona gubi svoju čvrstoću. Gubitak čvrstoće kosti uzrokuje gubitak čvrstog kontakta između same kosti i elemenata korištenih za fiksaciju prijeloma. Nestabilnost elemenata korištenih za fiksaciju frakturnih ulomaka rezultira pomakom ulomaka i time onemogućuje međusobno priližanje i mirovanje frakturnih ulomaka. Kao krajnji rezultat usporeno je cijeljenje kosti na mjestu prijeloma ili do cijeljenja uopće ne dolazi. Osim poremećaja samog cijeljenja, zbog stalnog pomicanja osteosintetskog sredstva (sredstvo za operacijski postupak spajanja kostiju [8]), koje zbog termičke osteonekroze prestaje biti fiksirano, dolazi do pucanja osteosintetskog sredstva. To je najizraženije kod prijeloma donjih ekstremiteta koji nose težinu tijela, odnosno kod kojih je najveće opterećenje na samom osteosintetskom materijalu.



Slika 1.2 Primjer zbrinjavanja prijeloma osteosintezom (lijevo) i kost oštećena termičkom osteonekrozom (desno) [7]

---

Mnogo je parametara koji utječu na porast temperature kosti tijekom bušenja. Složenost tog problema moguće je uvidjeti iz strukture i funkcije samog koštanog sustava koji nije samo mehanička potpora tijela nego sustav s mnogobrojnim metaboličkim funkcijama koje mogu biti poremećene povišenom temperaturom kosti.

Tijekom bušenja kosti u traumatologiji dolazi do znatnog povišenja temperature kosti. Za to je odgovorno više parametara. Dokazano je da je hlađenje svrdla tijekom bušenja kosti najznačajniji čimbenik u smanjenju porasta temperature kosti. Manji promjer svrdla uz nepromijenjene ostale parametre bušenja uzrokuje manji porast temperature kosti tijekom bušenja. Također, maksimalni porast temperature kosti tijekom bušenja je manji ako se isto mjesto na kosti buši prvo svrdlom manjeg promjera, potom svrdlom većeg promjera, nego ako se odmah buši isti provrt svrdlom većeg promjera.

Poznato je da temperatura koja prelazi 42 °C uzrokuje poremećaj metabolizma kosti, a temperatura iznad 47 °C tijekom 1 minute izaziva ireverzibilne (trajne, nepovratne) promjene kako građe tako i funkcije kosti. [7]

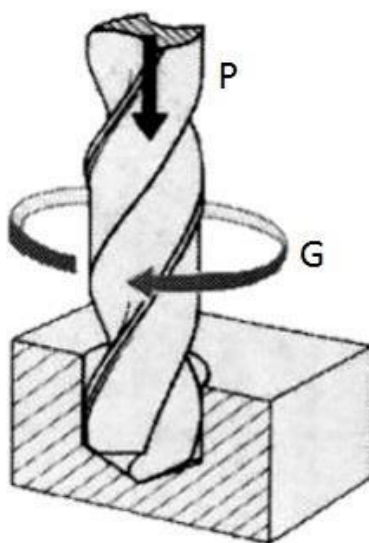
---

### **1.3. Motivacija i cilj rada**

Mnogi istraživači uvidjeli su problematiku vezanu uz povećanje temperature pri bušenju kostiju i zato danas postoji trend bušenja kostiju većim brzinama zbog smanjenja temperature u zoni rezanja. Pregled istraživanja na tu temu dan je detaljnije u poglavlju 3. No u većini slučajeva nisu razmatrani visokobrzinski parametri obrade i njihov utjecaj na istrošenost alata. Cilj ovog rada je usporediti dva režima obrade (niskobrzinski i visokobrzinski). Niskobrzinski predstavlja otprilike režim koji se trenutno primjenjuje tijekom operacija. Visokobrzinski je režim s većom brzinom rezanja. Na temelju nekih dokaza u prijašnjim istraživanjima [9, 10, 11, 12], pretpostavlja se da će povećanje temperature bušenja kosti pri većim brzinama biti manje u odnosu na parametre obrade koji se danas koriste. Time se želi utvrditi utjecaj parametara obrade prilikom sanacije prijeloma kosti kako bi se smanjila opasnost od pojave termičke osteonekroze.

## 2. POSTUPAK OBRADJE BUŠENJEM

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica koji se upotrebljava za bušenje provrta manjih promjera (5 - 10 mm) ili proširivanje provrta većih promjera. Izvodi se na alatnim strojevima, pretežno bušilicama, pri čemu je glavno gibanje kružno kontinuirano, a posmično gibanje pravolinijsko kontinuirano i izvodi se istodobno kad i glavno gibanje. Ako se obrada izvodi na bušilicama sva gibanja izvodi alat. Slika 2.1 shematski prikazuje obradu bušenjem.



Slika 2.1 Postupak bušenja s označenim posmičnim (P) i glavnim (G) gibanjem [13]

Alat za bušenje je svrdlo, definirane geometrije reznog dijela, s dvije glavne rezne oštrice i jednom poprečnom oštricom koja otežava obradu.

Bušenje karakterizira:

- promjenjiva brzina rezanja duž glavne oštrice,
- promjenjivi kutovi rezanja duž glavne oštrice,
- otežano odvođenje odvojene čestice i dovod SHIP-a,
- mala krutost sustava. [13]

Uz osnovne bušilice (stupna, viševretna i koordinatna) moguće je još navesti: ručne bušilice, prijenosne električne bušilice, stolne bušilice, stolno stupne bušilice, redne bušilice, revolverске bušilice, radijalne bušilice, vodoravne bušilice, bušilice glodalice, bušilice za duboko bušenje, bušilice za urezivanja navoja [14]. U medicini se koriste ručne bušilice, a one se s obzirom na vrstu pogona mogu podijeliti na električne i pneumatske.

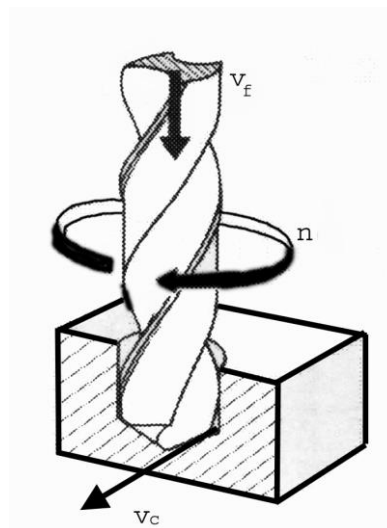
Rashladno sredstvo koje se koristi kod postupaka obrade odvajanjem naziva se SHIP, što je skraćenica za sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, a ujedno predstavlja i njegove osnovne funkcije.

U ovom poglavlju bit će opisani parametri bušenja, alat za bušenje, svrdla koja se koriste u kirurgiji za bušenje kosti, sile rezanja koje se pojavljuju kod obrade bušenjem te trošenje svrdla.

## 2.1. Parametri bušenja

Osnovni parametri kod bušenja su brzina rezanja, posmak, promjer svrdla i dubina bušenja. Neki od njih su prikazani na slici 2.2.

Prema [15] jedan od ciljeva kod procesa odvajanjem čestica je da kod obrade nekog materijala alat što duže traje. Još jedan način odabira brzine rezanja može biti odabir brzine kod koje će produktivnost proizvodnje biti najveća.



Slika 2.2 Shematski prikaz parametara bušenja [15]

Brzina rezanja  $v_c$  je obodna brzina na svrdlu, odnosno brzina s kojom alat obrađuje obradak, i ovisi o:

- alatu kojim se buši,
- potrebnom stanju površine nakon bušenja,
- hlađenju za vrijeme bušenja,
- snazi stroja,
- posmaku.

Brzine rezanja se mogu naći u obliku dijagrama, tablica, a ima i programskih podrška koje same računaju potrebne parametre. [16]

Prema [15] brzina rezanja  $v_c$  računa se prema izrazu:

$$v_c = d \times \pi \times n \quad (2.1)$$

Gdje je:

$d$  – promjer svrdla (mm),

$n$  – broj okretaja svrdla (učestalost vrtnje) (okr/min).

Posmak  $f$  (mm/okr) je put koji obavi svrdlo u pravcu osi alata za jedan okret alata, a računa se kao:

$$f = f_z \times z \quad (2.2)$$

Gdje je:

$f_z$  – posmak za jednu oštricu,

$z$  – broj oštrica (za svrdlo  $z$  iznosi 2).

Posmična brzina  $v_f$  ili posmak u jedinici vremena (mm/min) računa se iz poznatog posmaka i broja okretaja svrdla:

$$v_f = f \times n = f_z \times z \times n \quad (2.3)$$

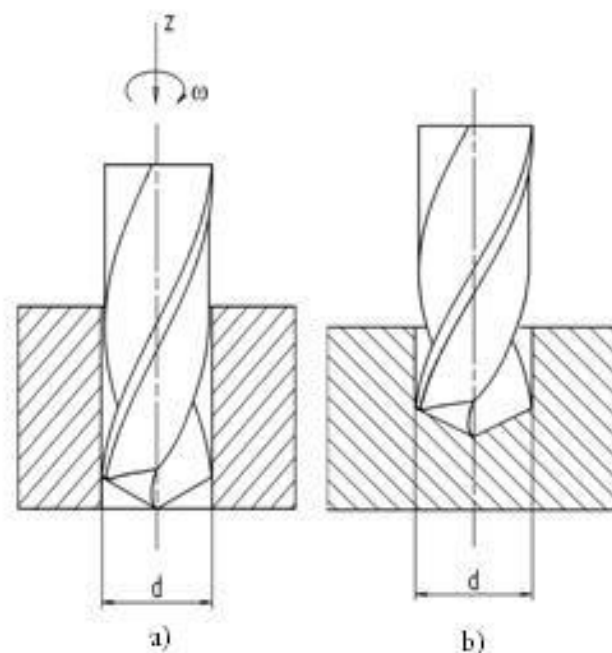
Pri bušenju dubokih provrta potrebno je, zbog otežanog odvođenja odvojene čestice i smanjene krutosti svrdla s povećanjem dubine bušenja, smanjiti posmak. Osim toga potrebno i povremeno izvlačiti svrdlo radi čišćenja njegovih utora tj. radi izbacivanja odvojenih čestica. Izbor posmaka uglavnom se vrši s obzirom na stabilnost sustava alat – alatni stroj – obradak i s obzirom na mogućnost odvođenja odvojene čestice kada je u pitanju obrada veće dubine.

Dubina rezanja  $a_p$  (mm) pri bušenju u punom materijalu iznosi:

$$a_p = \frac{d}{2} \quad (2.4)$$

## 2.2. Alat za bušenje

Svrkla su alati koji se upotrebljavaju za bušenje i proširivanje provrta različitih dubina u raznim materijalima. Korištenjem odgovarajućeg alata izrađuju se prolazni i neprolazni provrti ili se proširuju provrti manjeg promjera. Prolazni provrt nastaje kada svrdlo u procesu bušenja prolazi kroz cijelu dubinu materijala (slika 2.3 – a), dok neprolazni provrt nastaje kada se bušenje prekida na raznim dubinama bušućeg materijala i ne postoji izlazni provrt (slika 2.3 – b).



**Slika 2.3 Bušenje a) prolaznog i b) neprolaznog provrta spiralnim svrdlom [15]**

Postoji više podjela svrdla, a najpraktičnija je podjela prema načinu korištenja i izgledu radnog, aktivnog dijela svrdla. Svrkla se mogu podijeliti na:

- spiralna svrdla,
- svrdla s pločicama od tvrdog metala,
- ravna svrdla,
- zabušavala,
- specijalne izvedbe spiralnih svrdala,
- noževe i motke za bušenje. [15]

### 2.3. Svrldo u kirurgiji

Prema [1] spiralnim se svrdlima u ortopedskim i traumatološkim zahvatima buše provrti u kosti, gdje se potom vijcima fiksiraju implantati, odnosno odgovarajuća osteosintetska sredstva za fiksaciju na mjestu prijeloma. Najčešći kemijski sastav ovih alata je 0,9 % ugljika, 18 % kroma, 1,1 % molibdena, 1 % mangana, 1 % silicija i 78 % željeza. Slika 2.4 prikazuje standardno spiralno svrdlo korišteno u kirurgiji.

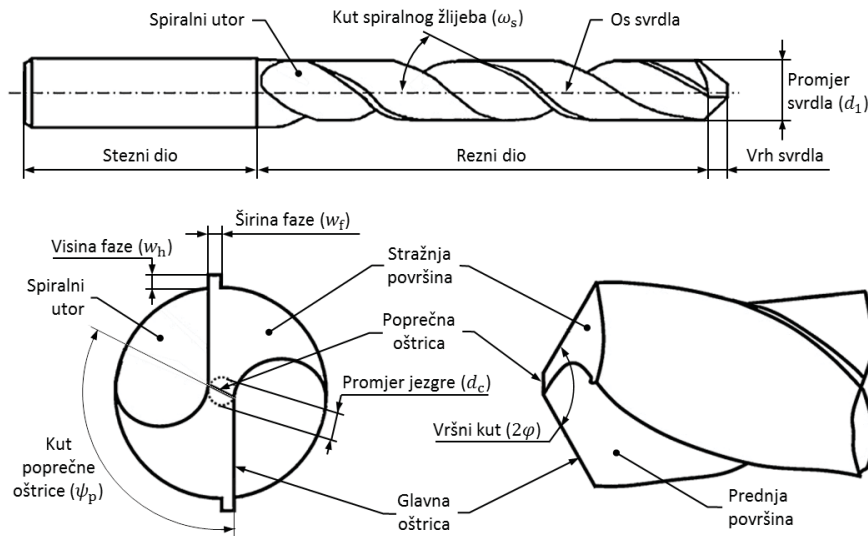


**Slika 2.4 Standardno spiralno svrdlo primijenjeno u kirurgiji [1]**

Spiralna svrdla su cilindrično-rotacijski alati koji se sastoje iz steznog i radnog dijela (slika 2.5). Stezni dio svrdla čini drška koja može biti cilindrična ili konična, a služi za prihvat svrdla i prijenos okretnog momenta. Radni dio svrdla čine spiralni utori koji odvođe odvojene čestice, te kalibrirajući i rezni dio svrdla.

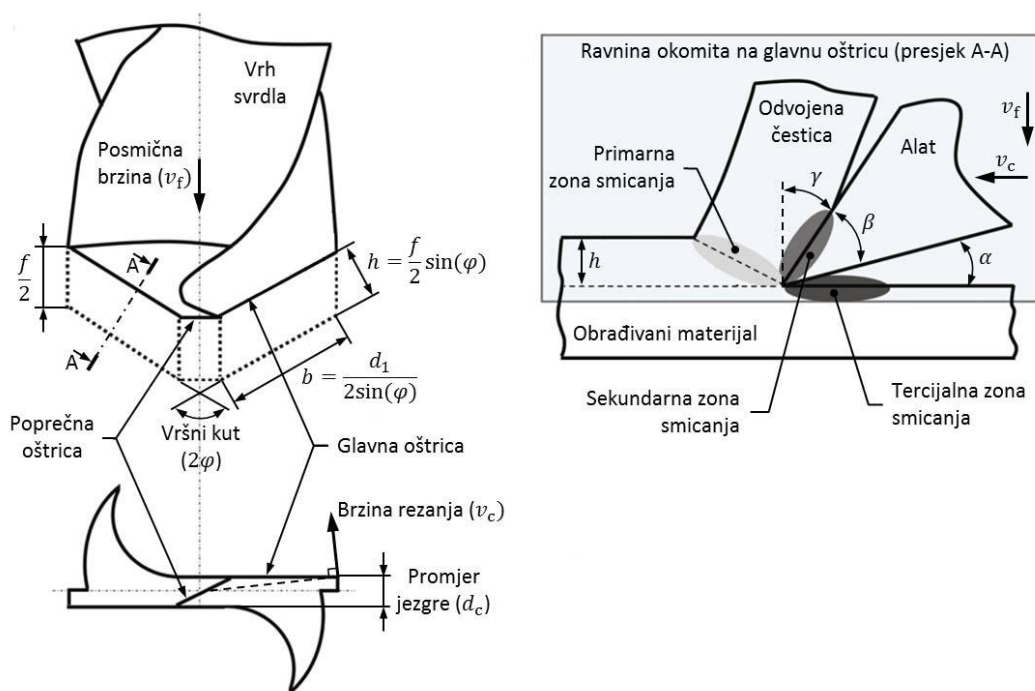
Parametri koji karakteriziraju rezni dio su promjer svrdla ( $d_1$ ), kut spiralnog žlijeba ( $\omega_s$ ), vršni kut svrdla ( $2\varphi$ ), promjer jezgre ( $d_c$ ), kut poprečnog brida ( $\psi_p$ ), visina faze ( $w_h$ ), širina faze ( $w_f$ ) i kut stražnje površine ( $\alpha$ ). Kraj reznog dijela završava s dvije glavne oštrice, koje su međusobno spojene poprečnom oštricom i koje su međusobno simetrične u odnosu na os svrdla.





Slika 2.5 Geometrija spiralnog svrdla [1]

Slika 2.6 prikazuje proces odvajanja čestica kod bušenja. Stražnji geometrijski kut zatvoren je površinom okomitom na os svrdla i stražnjom površinom svrdla koja je okrenuta prema površini rezanja. Prednja površina svrdla, odnosno zavojna površina utora po kojoj klizi odvojena čestica s pravcem osi svrdla zatvara kut prednje površine  $\gamma$ . Prednja i stražnja površina zatvaraju kut klina  $\beta$ , odnosno kut oštrenja.



Slika 2.6 Shematski prikaz procesa odvajanja čestica kod bušenja [1]

---

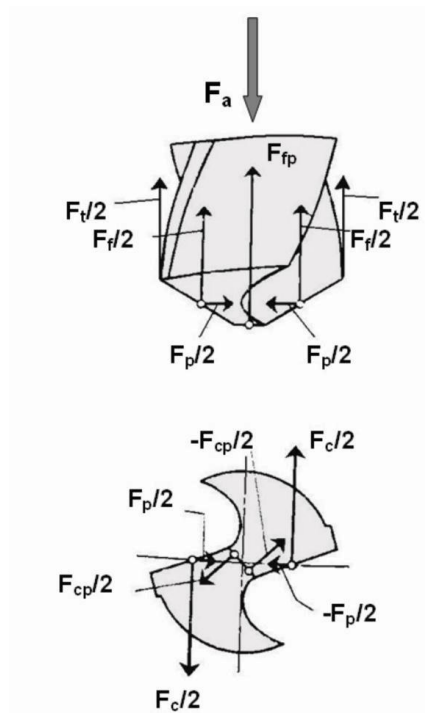
Glavne oštrice međusobno zatvaraju vršni kut svrdla koji utječe na otpornost jezgre te na prednji i stražnji geometrijski kut. Povećanjem vršnog kuta povećava se i otpor rezanja, što uvjetuje i veća opterećenja svrdla na uvijanje i izvijanje. Zavisno o tvrdoći obrađivanog materijala, vršni kut se obično kreće između  $80^\circ$  i  $140^\circ$ , pri čemu se za tvrde materijale izrađuju svrdla s većim vršnim kutom.

Poprečna oštrica s ravninom koja prolazi glavnom oštricom paralelno sa smjerom osi svrdla zatvara kut poprečne oštrice. Povećanjem poprečnog kuta povećava se posmična sila, što uvjetuje povećanje utroška snage tijekom bušenja.

Veličina prednjeg geometrijskog kuta uvjetovana je i iznosom kuta spiralnog žlijeba. S povećanjem kuta spiralnog žlijeba povećava se i prednji geometrijski kut, što s jedne strane povoljno djeluje na uvjete rezanja, ali istovremeno i smanjuje krutost svrdla, a time i trajnost oštrice. [1]

## 2.4. Sile rezanja kod bušenja

Slika 2.7 prikazuje sile rezanja koje tijekom bušenja djeluju na svrdlo.



Slika 2.7 Sile rezanja kod bušenja [1]

Prema [1] u idealnim je uvjetima poprečni presjek odvojene čestice na svakoj reznoj oštrici jednak, što uvjetuje i jednake sile rezanja:

- sile na glavnim oštricama:
  - dvije jednake i suprotno usmjerene glavne sile rezanja  $F_c/2$ ,
  - dvije jednake i istog smjera posmične sile  $F_f/2$ ,
  - dvije jednake i suprotno usmjerene natražne sile  $F_p/2$ ;
- sile na poprečnoj oštrici:
  - dvije jednake i suprotno usmjerene glavne sile rezanja poprečne oštrice  $F_{cp}/2$ ,
  - posmična sila poprečne oštrice  $F_{fp}$ ;
- sile trenja  $F_f/2$  uzrokovane trenjem svrdla, obrađene površine i odvojenih čestica.

Aksijalna sila bušenja određena je zbrojem svih vertikalnih komponenti, to jest:

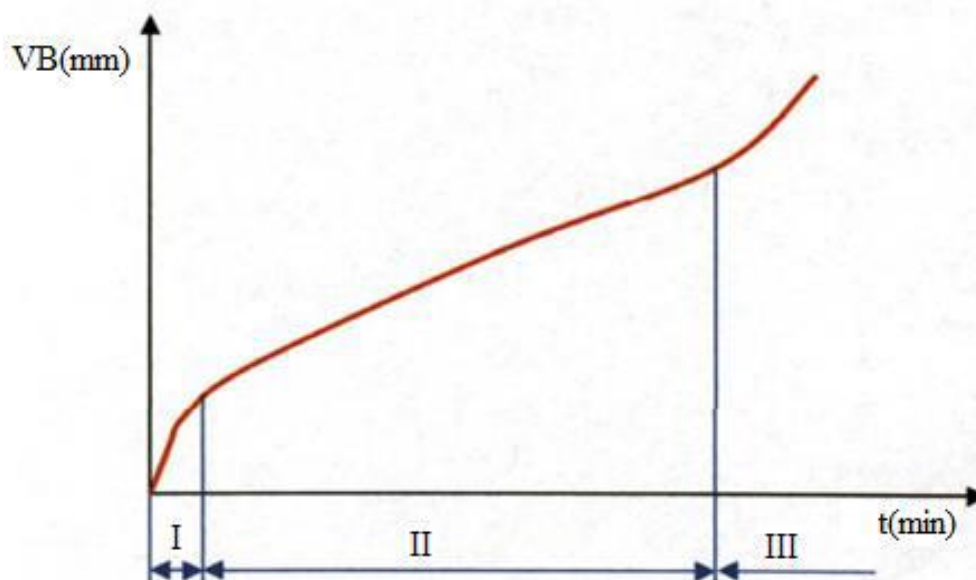
$$F_a = F_f + F_{fp} + F_t \quad (2.4)$$

## 2.5. Trošenje alata kod bušenja

Prema [17] trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. Prema tome sve procese obrade odvajanjem, pa tako i bušenje, prati proces trošenja oštrice reznog dijela alata. Sam proces trošenja posljedica je opterećenja kojima je alat izložen tijekom procesa obrade. Prema [15] alat za bušenje podvrgnut je za vrijeme rada mehaničkim, toplinskim i kemijskim opterećenjima koja uzrokuju promjenu geometrijskog oblika oštrice tj. njezinu istrošenost. Uzroci koji najčešće dovode do trošenja su:

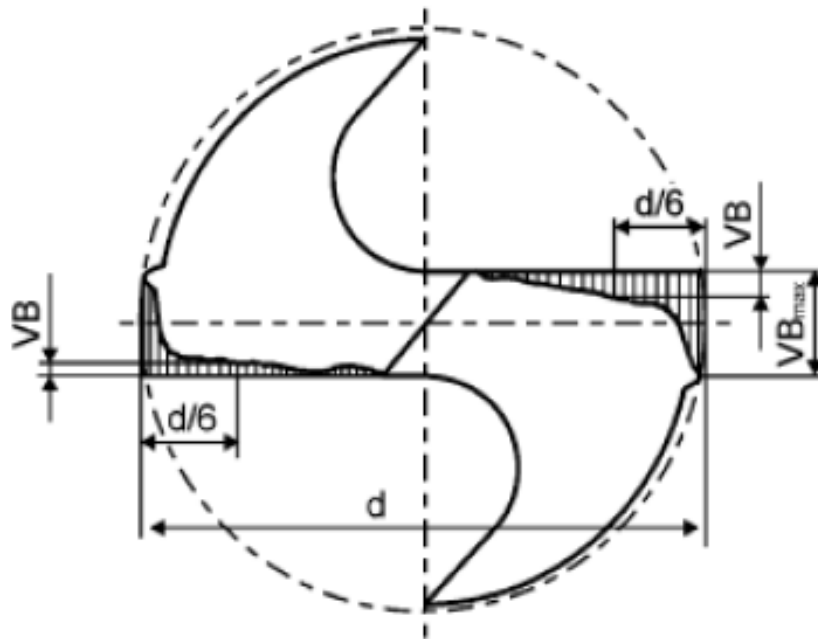
- plastična deformacija alata uslijed djelovanja temperature,
- mehaničko trošenje alata na prednjoj i stražnjoj površini,
- pucanje oštrice uslijed promjenjivog opterećenja,
- odvajanje ili lom pojedinih dijelova alata.

Prema tome svrdla imaju određeni vijek u kojem se mogu upotrebljavati, što je prikazano na slici 2.8, gdje je prikazana krivulja trošenja reznih alata. U području I prikazan je početak trošenja alata (period uhadavanja), područje II prikazuje vijek upotrebe alata odnosno pravocrtnu promjenu trošenja u vremenu (period „normalnog“ trošenja alata), dok područje III prikazuje istrošenje alata i nepogodnost, no ne i nemogućnost, daljnje upotrebe alata (period naglog trošenja).



Slika 2.8 Tipična krivulja trošenja reznih alata [17]

Kao kriterij istrošenja alata najčešće se koristi srednja širina pojasa trošenja  $VB$  na stražnjoj površini alata. Na slici 2.9 prikazano je mjesto trošenja stražnje površine svrdla. Dinamika trošenja stražnje površine alata ovisi o parametrima obrade i o mehanizmima trošenja (abrazija, adhezija, oksidacija, difuzija,...) kojima je svrdlo izloženo. [17]



Slika 2.9 Trošenje stražnje površine svrdla [17]

### 3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Kao što je već spomenuto dosta istraživača se bavilo temom bušenja kosti i pojavom termičke osteonekroze. Povećanje temperature uslijed djelovanja trenja između svrdla i obrađivanje kosti tijekom bušenja je neizbježno, ali se ne bi trebalo dopustiti toliko povećanje temperature da dođe do oštećivanja kosti.

Puno čimbenika utječe na povećanje temperature, a to su:

- Konstrukcija svrdla (geometrija oštrice i vršnog kuta, promjer svrdla, nagib, broj i vrsta žljebova i sl.),
- Mehanička svojstva i kvaliteta svrdla,
- Svojstva kosti,
- Parametri bušenja (brzina rezanja, posmak, dubina bušenja),
- Sile rezanja,
- Stupanj istrošenosti oštrice alata,
- Način bušenja (kontinuirano ili u prekidima),
- Vrijeme trajanja bušenja,
- Upotreba SHIP-a.

U daljnjem tekstu dan je pregled dosadašnjih istraživanja na temu nekih od čimbenika koji utječu na povećanje temperature te su spomenuti i ukratko objašnjeni već neki razvijeni matematički modeli za ovu problematiku.

### 3.1. Utjecaj parametara bušenja na povećanje temperature

Ispravan odabir parametra bušenja, kao što su brzina rezanja, posmak i dubina obrade, može značajno utjecati na smanjenje temperature bušenja. Postoji mnoštvo istraživanja na temu odabira parametara obrade o kojoj su mišljenja oprečna. U nekim istraživanjima predlaže se korištenje manjeg posmaka [18], dok u drugim predlažu veći posmak [2] u cilju smanjenja povećanja temperature.

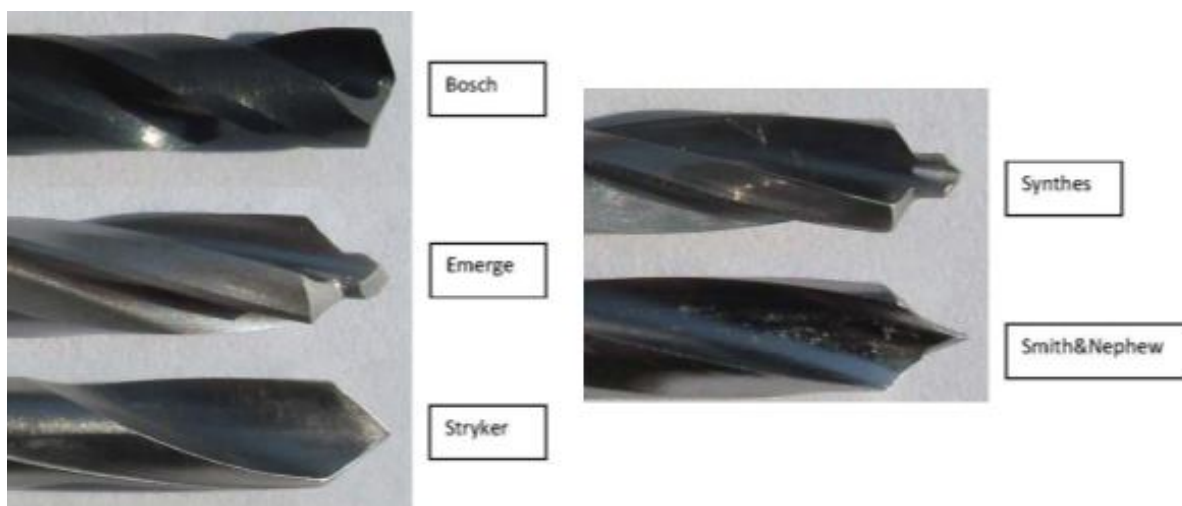
U istraživanju Fernandes et al. [18] konvencionalnim bušenjem svježih kortikalisa istražio se utjecaj promjera svrdla, frekvencije vrtnje i posmaka na temperaturu bušenja s dvije različite eksperimentalne metode. Testovi su izvedeni u kliničkoj i eksperimentalnoj okolini koristeći termoparove i termografiju za mjerenje temperature bušenja. Korištene su različite vrijednosti posmaka (15 - 70 mm/min), promjera svrdla (4, 5 i 6 mm) i frekvencije vrtnje (520, 900 i 1370 okr/min) uz istu dubinu obrade (8 mm). Rezultati istraživanja su pokazali da povećanje temperature iznimno ovisi o promjeru svrdla, brzini rezanja i posmaku. Veće temperature izmjerene su pri većim promjerima svrdla i većim brojem okretaja, a pri manjim posmacima. Zaključeno je da je promjer svrdla najkritičniji parametar jer njegova promjena uzrokuje najveće temperature kod bušenja kostiju.

Različiti parametri kao što su frekvencija vrtnje svrdla, posmak i dubina obrade testirani su u drugom istraživanju Fernandes et al. [2] gdje su izvršena bušenja kortikalisa i umjetnih biomehaničkih blokova. Ti blokovi su odobreni za ispitivanja ortopedskih uređaja i instrumenata, a izrađeni su od poliuretanske pjene koja se koristi kao alternativa za testiranje kostiju zbog svojih konstantnih i jednolikih svojstava čime se eliminiraju varijable koje se susreću kod testiranja ljudskih kostiju. Bušenja su izvršena s istom geometrijom svrdla (promjer 4 mm, vršni kut 118°), različitim dubinama obrade (8 i 30 mm), različitim posmacima (25, 50 i 70 mm/min) i različitim frekvencijama vrtnje (600, 800, 900 i 1200 okr/min). U ovom istraživanju je dokazano da se različitim odgovarajućim kombinacijama parametara obrade može dobiti temperatura bušenja puno manja od kritičnih vrijednosti temperature. Zaključno, kada su frekvencija vrtnje i posmak veći, povećanje temperature je manje. Neovisno o tome, povećanjem dubine obrade, povećava se i maksimalna temperatura bušenja. Preporučuje se upotreba visokobrzinske obrade s velikim posmakom i smanjenje područja kontakta između svrdla i kosti, tj. smanjenje dubine obrade. Poliuretanski blok pokazao se prikladnim materijalom jer dobro oponaša prirodnu kost pri bušenju.

### 3.2. Utjecaj konstrukcije alata na povećanje temperature

Najznačajniji konstrukcijski parametri svrdla su promjer svrdla, geometrija oštrice, geometrija vršnog kuta te vrsta, broj i nagib žljebova. Žljebovi ili spirale svrdla imaju funkciju odvođenja odvojene čestice i sprječavanje porasta sile trenja u zoni rezanja uzrokovanog zaostalim česticama, čime se značajno utječe na smanjenje temperature kosti. Ako dođe do neprohodnosti čestica, naglo raste maksimalna temperatura bušenja kao i trajanje bušenja. [1]

U radu Hein et al. [19] testirano je 5 različitih svrdla, od kojih su 4 standardna medicinska svrdla (Synthes, Stryker, Smith & Nephew i Emerge), a jedno industrijsko (Bosch). Ispitivana medicinska svrdla su puno skuplja nego odgovarajuće industrijsko svrdlo slične veličine. Sva medicinska svrdla promjera su 4 mm, dok promjer Bosch svrdla iznosi 3.97 mm. Korištena frekvencija vrtnje iznosila je 990 okr/min, posmak 5 mm/s, a dubina obrade 20 mm. Na slici 3.1 dan je komparativni prikaz konstrukcije svakog testiranog svrdla.



Slika 3.1 Usporedba konstrukcije svrdla [19]

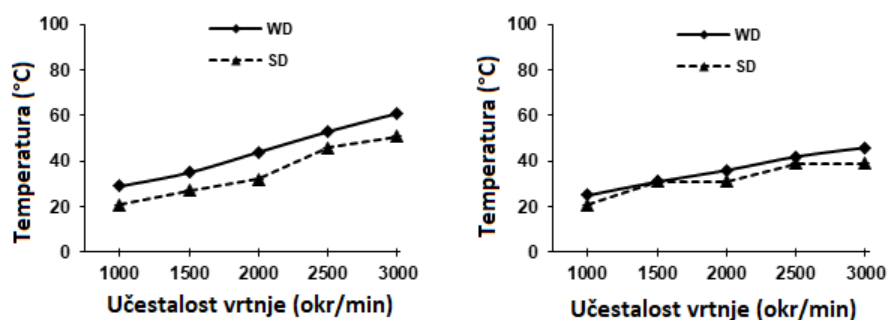
Rezultati pokazuju da se korištenjem industrijskog svrdla generiralo najmanje topline tijekom bušenja. To svrdlo ima najveći kut spiralnog žlijeba što doprinosi učinkovitijem odvođenju odvojene čestice, smanjuje trenje i stvaranje topline. Nadalje, dvostupnjevana medicinska svrdla (Emerge, Smith & Nephew, Synthes) su nadmašila jednostupnjevano svrdlo (Stryker). Industrijsko svrdlo košta vrlo malo u odnosu na druga svrdla, ali se u ispitivanjima pokazalo boljim rješenjem u odnosu na sva medicinska svrdla. Razlog tome su geometrijske karakteristike spiralnih utora. [19]



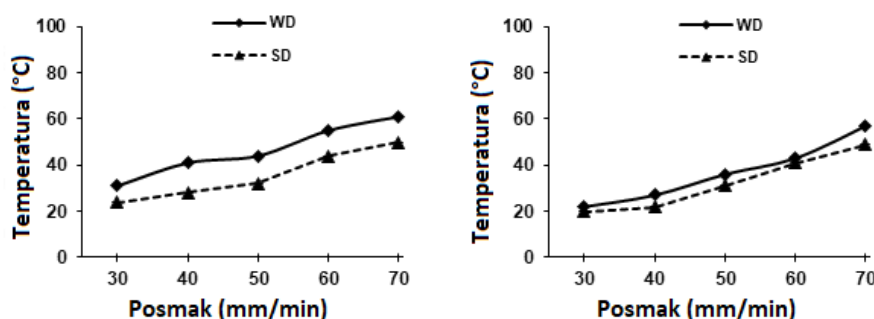
### 3.3. Utjecaj trošenja oštrice alata na povećanje temperature

Procesi trošenja potaknuti toplinskim opterećenjem alata najvećim dijelom doprinose postupnom trošenju alata. S druge strane, prevelika mehanička opterećenja mogu izazvati mehanički umor, krhanje ili lom oštrice. [1]

Istrošeno svrdlo može imati značajan utjecaj na proces bušenja kosti. Ne postoji propisani broj izbušenih provrta koji označuje svrdlo istrošenim i neprimjerenim za daljnju uporabu. U nekim slučajevima odluka za zamjenu svrdla nakon ponovljenog korištenja ovisi o kvaliteti svrdla, karakteristikama kosti koja se buši, broju ciklusa sterilizacije svrdla i okolišnim uvjetima kao što je hlađenje s fiziološkom otopinom. U radu Alam et al. [4] uspoređivale su se temperature bušenja kostiju korištenjem oštrog i istrošenog svrdla. Korišteni su različiti posmaci (30, 40, 50, 60 i 70 mm/min), frekvencije vrtnje (1000, 1500, 2000, 2500 i 3000 okr/min) i promjeri svrdla (4,8 i 2,5 mm). Rezultati su pokazali veće povećanje temperature kod istrošenog svrdla u odnosu na oštro svrdlo u svim kombinacijama parametara obrade, što je prikazano na slikama 3.2 i 3.3 (WD – istrošeno svrdlo; SD – oštro svrdlo). Preporučuje se korištenje nižih brzina i za oštro i za istrošeno svrdlo u prisustvu primjerenih uvjeta hlađenja.



Slika 3.2 Dijagram temperatura – frekvencija vrtnje za promjer svrdla 4,8 mm (lijevo) i 2,5 mm (desno) pri 50 mm/min [4]



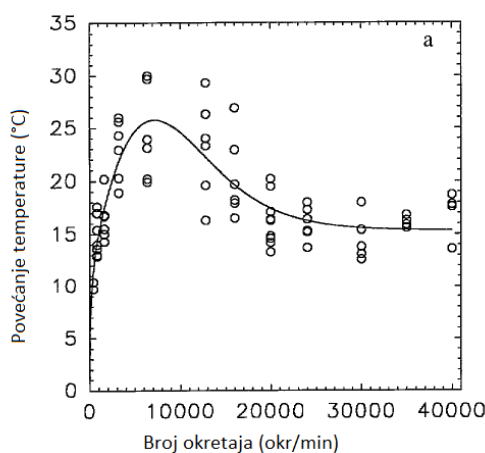
Slika 3.3 Dijagram temperatura – posmak za promjer svrdla 4,8 mm (lijevo) i 2,5 mm (desno) pri 2000 okr/min [4]

### 3.4. Utjecaj visokobrzinske obrade na povećanje temperature

Povećanjem frekvencije vrtnje (broja okretaja) svrdla smanjuje se sila rezanja i vrijeme obrade. Bušenjem metala, metalna odvojena čestica odnosi gotovo 85% ili više topline. U usporedbi s bušenjem metala, temperatura kosti sve se više povećava tijekom procesa bušenja zbog loše toplinske vodljivosti kosti pa odvojene čestice odnose manji postotak topline. Međutim, odvojene čestice i dalje odnose popriličan dio stvorene topline pa brže odvođenje odvojene čestice može smanjiti ukupnu količinu topline prenesene na kost. Poznato je da je porast temperature proporcionalan porastu brzine rezanja, no nakon postizanja određene temperature (maksimum temperature), temperatura se daljnjim porastom brzine rezanja smanjuje, tj. temperatura i brzina rezanja prestaju biti linearne. [11]

Istraživanje Abouzgia et al. [10] bavi se utjecajem brzine na povećanje temperature i trajanje povećanja temperature tijekom bušenja kosti, a raspon vrijednosti frekvencije vrtnje iznosio je od 20000 do čak 100000 okr/min. Rezultati pokazuju kako rast temperature i vrijeme porasta temperature padaju s povećanjem brzine. Pri većim frekvencijama vrtnje povećanje temperature vrlo je malo zbog povećane brzine prodiranja što dovodi do cjelokupnog smanjenja vremena bušenja.

Rad Reingewirtz et al. [11] istražuje razne parametre (utjecaj opreme, utjecaj frekvencije vrtnje, utjecaj predbušenja itd.) koji bi mogli utjecati na zagrijavanje kosti i/ili na vrijeme trajanja bušenja. Temperatura je proučavana s povećanjem frekvencije vrtnje od 400 do 40000 okr/min. Rezultati (slika 3.4) pokazuju pozitivnu korelaciju između povećanja temperature i frekvencije vrtnje od 0 do 10000 okr/min. Nakon toga, povećanje temperature dostiže maksimum, a zatim pada s povećanjem frekvencije vrtnje do otprilike 24000 okr/min. Nadalje, temperatura skoro ostaje nepromijenjena do 40000 okr/min.



Slika 3.4 Utjecaj frekvencije vrtnje na povećanje temperature [11]

U radu Udiljak et al. [12] istražuju se mogućnosti smanjenja vrijednosti aksijalne sile i temperature procesa bušenja kosti primjenom pogodnih parametara obrade. Pokus je izvršen s dvije vrste svrdla – klasičnim kirurškim svrdlom i dvostrupnjevanim svrdlom, a korištene su frekvencije vrtnje u području između 3000 i 24000 okr/min. Rezultati pokazuju da broj okretaja ne utječe na aksijalnu silu bušenja, ali utječe proporcionalno na maksimalnu temperaturu bušenja. Povećanjem frekvencije vrtnje kod klasičnog kirurškog svrdla povećava se i temperatura bušenja kosti. Stoga preporučuju smanjenje brzine koliko god je moguće pri klasičnom bušenju kosti. Posmak djeluje proporcionalno na aksijalnu silu bušenja i obrnuto proporcionalno na povećanje temperature, stoga preporučuju koristiti što veći posmak. Nadalje, rezultati pokazuju da temperatura raste tijekom visokobrzinske obrade korištenjem dvostupnjevanog svrdla, no kod klasičnog svrdla temperatura se skoro ne mijenja s povećanjem frekvencije vrtnje svrdla. Visokobrzinska se smatra boljom zbog kraćeg trajanja procesa pa visoka temperatura djeluje na kost kraće vrijeme i zato je vjerojatnost nekroze manja.

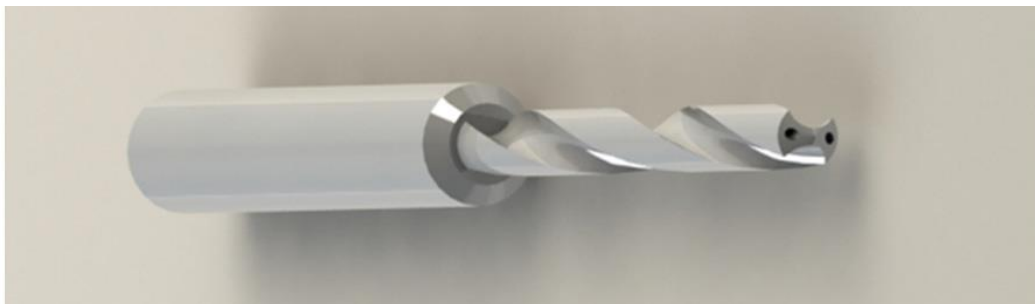
Rad Shakouri et al. [9] bavi se utjecajem visokobrzinske obrade na povećanje temperature pri bušenju kosti. Usredotočuje se na povećanje brzine odvođenja odvojene čestice povećanjem vrijednosti frekvencije vrtnje svrdla i smanjenjem sila rezanja. Korištene frekvencije vrtnje u rasponu su od 500 do 18000 okr/min (konvencionalna obrada: 500 - 1000 okr/min s korakom od 250 okr/min; visokobrzinska obrada: 3000 - 18000 okr/min s korakom od 1000 okr/min), a posmak varira s vrijednosti od 50, 100 i 150 mm/min. Rezultati ukazuju na to da se povećanjem frekvencije vrtnje svrdla kod konvencionalne obrade smanjuje temperatura u zoni obrade za 3,4 - 4 °C te da povećanje posmaka značajno ne utječe na proces. Kod visokobrzinske obrade povećanjem posmaka smanjuje se temperatura. Povećanjem frekvencije vrtnje od 3000 do 18000 okr/min uočeno je povećanje temperature u zoni obrade. Međutim, uočeno je smanjenje temperature za posmake u vrijednosti od 100 i 150 mm/min pri frekvenciji vrtnje od 6000 do 7000 okr/min, što ujedno predstavlja i minimalne izmjerene temperature u eksperimentu. Povećanje posmaka dovodi do većih posmičnih brzina i smanjenja trajanja procesa bušenja. Jedino ograničenje upotrebe velikog posmaka tijekom procesa bušenja kosti je mogućnost pucanja svrdla unutar kosti ili nastajanje napukline na slomljenom mjestu. Preporučuje se upotreba frekvencije vrtnje vrijednosti od 7000 okr/min i posmaka od 100 do 150 mm/min.

### 3.5. Utjecaj rashladnog sredstva na povećanje temperature

Plastična deformacija odvojene čestice, trenje između alata i površine provrta i trenje između odvojene čestice i površine provrta uzrokuju stvaranje topline na mjestu bušenja. Dio topline odvodi se protokom krvi, a dio se prenosi iz provrta odvojenom česticom. Ljudska kost ima malu toplinsku vodljivost i zbog toga većina topline ostaje u zoni bušenja. [20]

Pri operacijama čovjeka moraju se koristiti rashladna sredstva koja ne štete organizmu čovjeka kao što je fiziološka otopina, ugljični dioksid i slično.

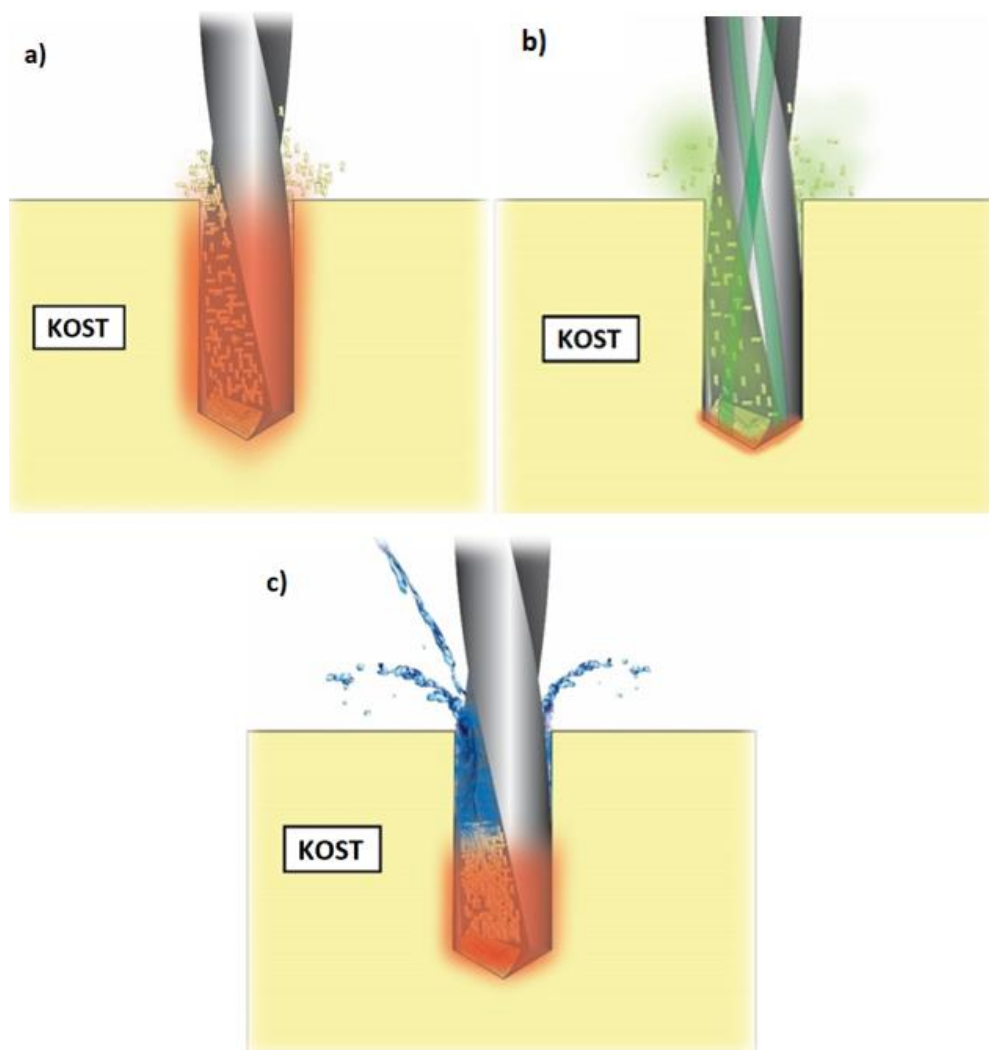
Shakouri et al. [20] u svom su radu usporedili povećanja temperature u različitim procesima bušenja goveđih kostiju. Usporedba je napravljena između bušenja bez hlađenja, hlađenjem plinom i hlađenjem tekućinom. Testiranja su izvedena s vrijednostima frekvencije vrtnje od 1100 do 3200 okr/min, dubine obrade od 8 mm. Bušenje uz hlađenje plinom izvodilo se pomoću kanala unutar svrdla za unutarnje hlađenje, a koristili su se plinovi CO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>. Primjer svrdla s kanalima za unutarnje hlađenje dan je na slici 3.5.



**Slika 3.5 Svrđlo s kanalima za SHIP [20]**

Kod bušenja uz hlađenje tekućinom korištena je fiziološka otopina. Hlađenje tekućinom bilo je hlađenje izvana gdje tekućina dolazi do zone obrade preko žljebova svrdla.

Na slici 3.6 prikazan je shematski prikaz prijenosa topline kod sva tri načina bušenja. Sa shematskog prikaza može se vidjeti da je najbolje unutarnje hlađenje plinom jer odvojena čestica zbog visokog tlaka mora izaći iz područja bušenja što sprječava nakupljanje odvojene čestice u zoni rezanja. Kod hlađenja tekućinom se vidi da tekućina ne može djelotvorno doći do područja bušenja, tj. do područja oko vrha svrdla, a to se zbiva zbog nakupljanja odvojene čestice. Kod bušenja bez hlađenja većina topline ostaje u zoni obrade što i dovodi do termičke nekroze tkiva.



**Slika 3.6 Shematski prikaz prijenosa topline kod bušenja: a) bez hlađenja, b) uz hlađenje plinom, c) uz hlađenje tekućinom [20]**

Rezultati pokazuju da je kod bušenja uz hlađenje plinom povišenje temperature ograničeno na 6 °C čime je termička nekroza spriječena. Maksimalna temperatura kod bušenja bez hlađenja bila je 56 °C, kod bušenja uz hlađenje plinom 43 °C, a kod hlađenja tekućinom 42 °C. Rezultati također pokazuju da se korištenjem bušenja uz hlađenje plinom ili tekućinom smanjuje mogućnost termičke nekroze kostiju. Također, rezultati pokazuju da vrijednosti prikupljene tijekom bušenja s direktnim hlađenjem plinom ne ovise o frekvenciji vrtnje svrdla te je moguće obuhvatiti i veće dubine, dok kod hlađenja fiziološkom otopinom temperatura bušenja raste s povećanjem frekvencije vrtnje. Preporučuje se hlađenje plinom zbog svih navedenih prednosti i zbog povećanog rizika infekcije pri korištenju tekućina kao rashladnog sredstva. [20]

### 3.6. Predloženi matematički modeli procesa bušenja

U ovom radu dan je pregled mnogih istraživanja na temu utjecaja raznih čimbenika na povećanje temperature pri bušenju kostiju, no mnoga druga istraživanja se bave i rješavanjem problema povećanja temperature koristeći razne modele za predviđanje temperature ili za optimizaciju parametara obrade. Neki istraživači su razvili model klasifikacije trošenja alata [21] te ga povezali s temperaturom, neki su napravili model konačnih elemenata za evaluaciju ili optimizaciju parametara koji utječu na povećanje temperature [5, 22], dok su drugi razvili model za predviđanje temperature korištenjem signala okretnog momenta [23]. Detaljniji opis tih rješenja nalazi se u nadolazećem tekstu.

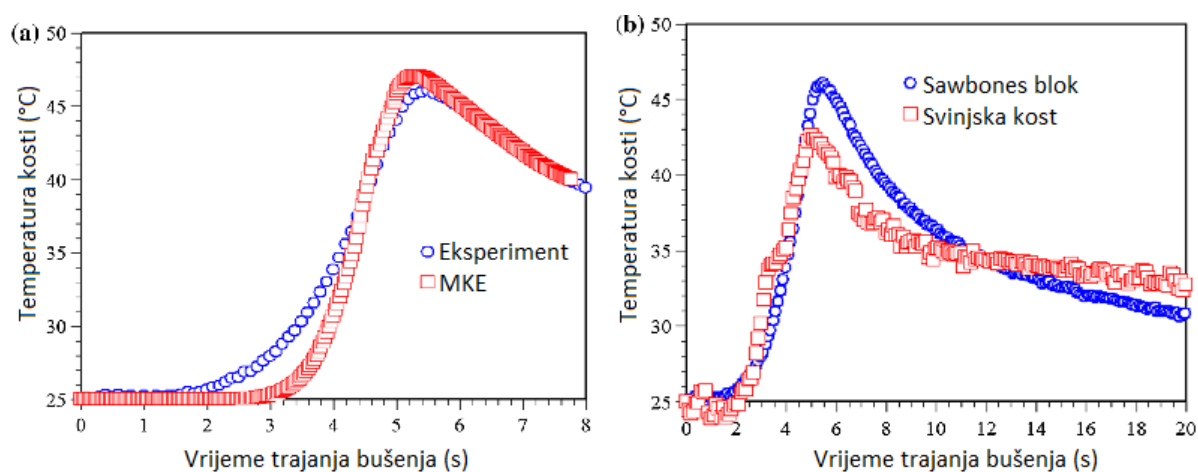
Postoje dvije glavne prepreke koje sprječavaju preciznu klasifikaciju stupnja istrošenosti alata. Direktno mjerenje trošenja alata tijekom procesa rezanja nije moguće zbog konstantnog kontakta između kosti i reznih oštrica alata. Ono se jedino može predviđati korištenjem značajki trošenja alata različitim tipovima signala i drugim poznatim parametrima obrade (brzina rezanja, posmak i karakteristike svrdla). Još k tome, industrijske primjene su pokazale da je trošenje alata uglavnom nelinearan i nekada čak djelomično stohastički proces. U istraživanju Staroveški et al. [21] razvijen je model trošenja medicinskog svrdla s mogućnosti klasifikacije stupnja istrošenosti. Model je verificiran eksperimentalno prikupljenim podacima iz više različitih senzora primjenom odgovarajućeg ispitnog postava. Analizirana su tri stupnja istrošenosti alata: oštro svrdlo, srednje istrošeno svrdlo i istrošeno svrdlo. Za svaki stupanj istrošenosti proveden je niz indirektnih mjerenja pri svim parametrima obrade predviđenih planom pokusa. Ukupno je postavljeno 36 stanja pokusa, odnosno 12 kombinacija posmaka i brzina rezanja za svaki razmatrani stupanj istrošenosti. Svako je stanje pokusa ponavljano 10 puta, čime je za svaki stupanj istrošenosti prikupljeno 120 mjerenja, tj. ukupno 360 mjerenja. Izmjereno je četiri tipa signala: sile rezanja, jakosti struja servomotora, vibracije i akustična emisija. Značajke izdvojene iz predmetnih signala analizirane su u cilju određivanja njihove osjetljivosti na stupanj istrošenosti alata i na temperaturu bušenja. Predloženi modeli za klasifikaciju stupnja istrošenosti i temperature bušenja razvijeni su primjenom neuronskih mreža s radijalnim baznim funkcijama čiji su ulazni podaci bili određeni kombinacijom odabranih značajki. Uspoređujući rezultate, može se zaključiti da značajke dobivene od signala sila rezanja imaju najveću osjetljivost na promjene istrošenosti alata, dok značajke dobivene iz signala akustične emisije imaju najmanju osjetljivost na promjene tvrdoće kostiju. Kombinacija značajki dobivenih iz signala akustične emisije i

signala jakosti struja pogonskih motora daje rezultate klasifikacije medicinskog svrdla. Primjena senzora akustične emisije se čini najznačajnijom jer su se pojedinačne dobivene značajke iz signala akustične emisije pokazale najkvalitetnijima, kao i kada su korištene u kombinaciji s drugim značajkama. Praktički su neosjetljive na promjene u mehaničkim svojstvima kosti. Rezultati ukazuju da se postavljeni model može koristiti primarno u procjeni istrošenosti svrdla, a posredno i u određivanju temperature bušenja i to u stvarnom vremenu za vrijeme obrade.

Rad Li et al. [22] bavi se razvojem trodimenzionalnog modela temeljenog na metodi konačnih elemenata za istraživanje prijenosa topline pri bušenju kostiju. Proučavana su tri parametra obrade: posmak, frekvencija vrtnje i promjer svrdla. Na temelju numeričkih rezultata modela, dana je empirijska formula za maksimalnu temperaturu koja ovisi o sva tri parametra. Formulom se određuje količina utjecaja svakog parametra i predviđa se maksimum temperature. Rezultati pokazuju da maksimalna temperatura bušenja tijekom procesa raste s povećanjem bilo koja od tri proučavana parametra. Također, provedena je analiza osjetljivosti svakog parametra na empirijsku formulu za maksimalnu temperaturu bušenja. Rezultati analize pokazuju da je maksimalna temperatura najosjetljivija na promjer svrdla u odnosu na posmak, a najmanje je osjetljiva na frekvenciju vrtnje svrdla. Simulacija ovog modela u numeričkom softveru temeljenog na analizi konačnih elemenata dokazala je da bi obrada s prekidnim posmakom mogla učinkovito smanjiti mogućnost termičke osteonekroze. Takva obrada bi mogla smanjiti temperaturu bušenja i skratiti vrijeme djelovanja visoke temperature na kost.

U radu Chen et al. [5] napravljen je trodimenzionalni dinamički model zasnovan na metodi konačnih elemenata te je eksperimentalno potvrđen i korišten za istraživanje parametara (frekvencija vrtnje svrdla, posmaka, promjera svrdla i gustoće kosti) koji utječu na temperaturu kosti tijekom bušenja. Bušenja su izvršena na svinjskim kostima i na umjetnim blokovima različitih gustoća proizvođača *Sawbones*. Prava kost ima ponašanje anizotropnog materijala, dok se umjetni materijal bloka smatra izotropnim materijalom. Dobiveni su rezultati temperature bušenja u ovisnosti o vremenu. Usporedbom rezultata dobivenih eksperimentom i modelom konačnih elemenata (slika 3.7 – a) može se zaključiti da mjerenja koja su dobivena modelom poprilično odgovaraju eksperimentalnim mjerenjima. Razlika između maksimalnih temperatura iznosi 1 °C, a vrijeme dostizanja maksimalne temperature razlikuje se za 0,3 s. Usporedbom rezultata dobivenih eksperimentalnim mjerenjem bušenja

umjetnog bloka i svinjske kosti (slika 3.7 – b), može se zaključiti da se bušenjem umjetnog bloka postižu veće maksimalne temperature ( $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) od maksimalnih temperatura bušenja svinjske kosti ( $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Razlog tome vjerojatno je razlika u svojstvima materijala. Vlaga ili krv u pravim kostima može smanjiti stvaranje topline prilikom postupka bušenja. Ipak, rezultati pokazuju da je umjetni blok korišten u ovom istraživanju komparabilan sa svinjskom kosti s obzirom na predviđena povećanja temperature tijekom bušenja kosti (slika 3.7 – a).



**Slika 3.7 a) Usporedba temperature kosti dobivenih metodom konačnih elemenata (MKE) i eksperimentom; b) Razlika temperature za Sawbones blok i svinjsku kost [5]**

Rezultati pokazuju da predloženi model može učinkovito simulirati povećanje temperature tijekom bušenja kosti. Povećanje temperature smanjuje se s povećanjem posmaka i frekvencije vrtnje, a raste s povećanjem promjera svrdla ili gustoće kosti. Raspodjela temperature značajno ovisi o trajanju bušenja. Model se smatra prikladnim za analizu utjecaja parametra tijekom bušenja kosti kako bi se smanjio rizik termičke nekroze kosti. [5]

U istraživanju Feldmann et al. [23] predložen je analitički model predviđanja temperature koji koristi signal okretnog momenta u procesu bušenja. Kako bi se omogućilo predviđanje povećanja temperature u realnom vremenu, ovaj rad se usredotočuje na razvoj novog modela koji omogućuje izračune u realnom vremenu tijekom procesa bušenja i dinamičku kontrolu nad procesom. Opsežno eksperimentalno istraživanje je provedeno u cilju kalibracije i ocjenjivanja modela. Otkriveno je da se povećanje temperature može predvidjeti samo s okretnim momentnom.



#### 4. EKSPERIMENTALNI POSTAV I MJERNA OPREMA

Uspješna primjena cjelovitog i robusnog sustava nadzora oštrice alata uvjetovana je mogućnostima integracije većeg broja različitih mjernih sustava s postojećim CNC upravljačkim sustavom stroja. Pritom se općenito misli na veći broj senzora s pripadajućim elektroničkim sklopovljem i softverskim modulima za obradu i analizu signala koje je potrebno povezati s CNC sustavom. Može se sa sigurnošću reći da u tom razmatranju ključnu prednost imaju CNC sustavi otvorene arhitekture. [1]

Pokus je proveden u Laboratoriju alatnih strojeva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U ovom poglavlju opisan je korišteni ispitni postav (slika 4.1) zasnovan na upravljačkom sustavu otvorene upravljačke arhitekture. Osnovne karakteristike ispitnog postava uključuju mogućnost paralelnog procesiranja u stvarnom vremenu uz istovremenu mogućnost vođenja do šest posmičnih motora i dva glavna vretena.

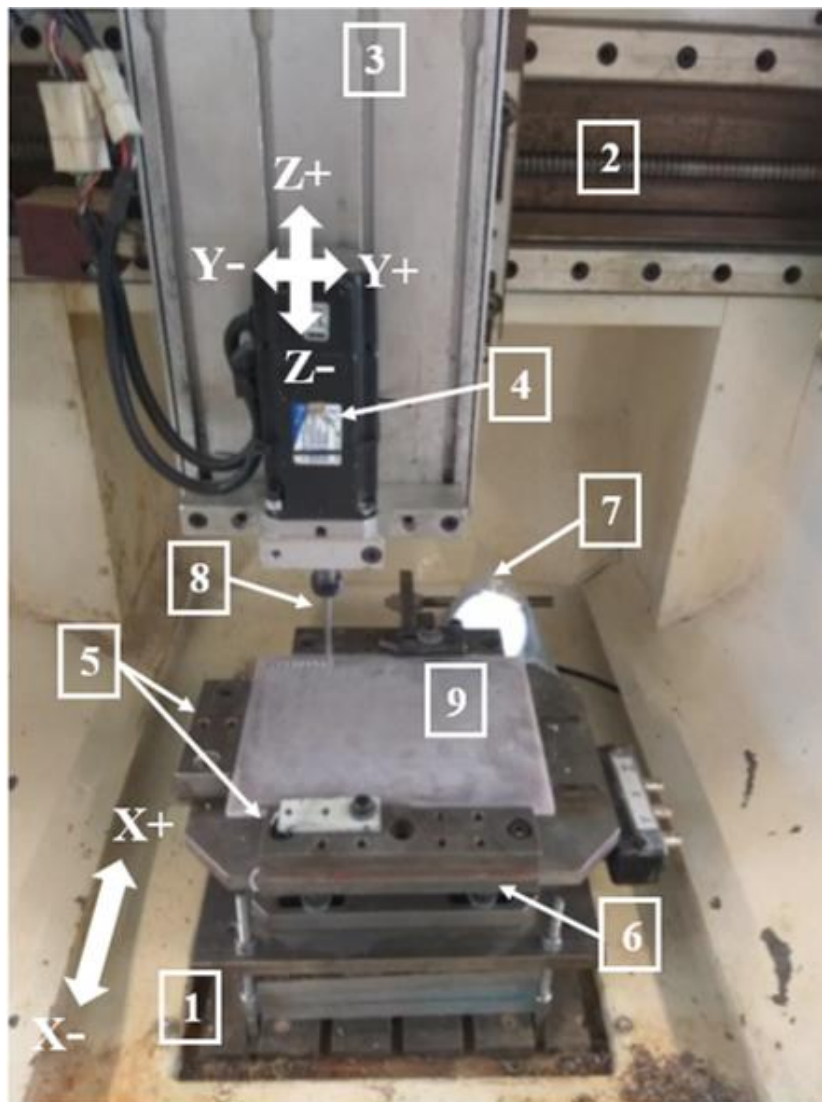
Postojeći sustav prilagođen je potrebama provođenja eksperimentalnog dijela ovog rada odgovarajućim ispitnim strojem i nizom eksternih mjernih uređaja prikladnih za nadzor trošenja alata. Glavni i posmični prigoni ispitnog stroja dimenzionirani su tako da očekivani poremećaji u signalima struja budu mjerljivi s obzirom na očekivane sile rezanja kod bušenja. U radni prostor stroja ugrađeni su tro-komponentni senzori sila i termopar za mjerenje temperature ispitnog uzorka te kamera za direktno određivanje parametara trošenja. [1]



Slika 4.1 Ispitni postav

#### 4.1. Ispitni stroj

Ispitni stroj je mala tro-osna glodalica (slika 4.2) gdje su posmični prigoni izvedeni kugličnim navojnim vretenima i kliznim vodilicama (slika 4.2 – 1, 2, 3). Glavni prigon (slika 4.2 – 4) je izveden izravnim prijenosom momenta glavnog motora na svrdlo prikladnom steznom glavom. Radni prostor stroja opremljen je sensorima za temperaturu i sile rezanja te kamerom za slikanje oštrice alata, a oni su detaljnije opisani u poglavlju 4.4.



- |                          |  |
|--------------------------|--|
| 1. Posmični prigon X osi | 6. Senzor sile   |
| 2. Posmični prigon Y osi | 7. Industrijska kamera s telecentričnim objektivom i rasvjetom |
| 3. Posmični prigon Z osi |  |
| 4. Glavni motor          | 8. Ispitno svrdlo  |
| 5. Stezna naprava        | 9. Ispitni uzorak  |

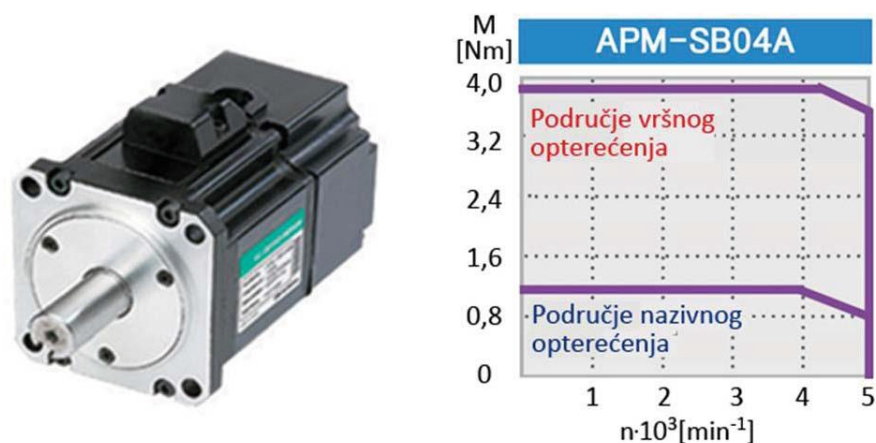
Slika 4.2 Ispitni stroj

Tablica 4.1 prikazuje osnovne tehničke karakteristike ispitnog stroja.

**Tablica 4.1 Osnovne tehničke karakteristike ispitnog stroja [1]**

		Iznos	Jedinica
Hod osi	X	350	Mm
	Y	450	
	Z	55	
	C	±360	°
Korak navojnog vretena osi	X, Y, Z	5	Mm
Maksimalna posmična brzina osi	X, Y, Z	15	m/min
	C	18000	°/s
Maksimalni brzi hod osi	X, Y, Z	25	m/min
	C	30 000	°/s
Nazivna učestalost vrtnje GV		3000	min <sup>-1</sup>
Maksimalna učestalost vrtnje GV		5000	min <sup>-1</sup>
Rezolucija pozicioniranja osi	X, Y, Z	0,4166	μm
	C	0,03	°
Dopušteno nazivno opterećenje osi	X, Y, Z	160	N
	C	1,274	
Maksimalno dopušteno opterećenje osi	X, Y, Z	500	N
	C	3,822	N · m

Motori korišteni za glavni i posmični prigon su sinkroni servo motori (tip APMSB04ADK) s permanentnim magnetima (slika 4.3) proizvođača *Mecapion Ltd* (Južna Koreja). Opremljeni su inkrementalnim enkoderima, a njihovi osnovni tehnički podaci prikazani su u tablici 4.2.



Slika 4.3 Sinkroni servo motor APMSB04ADK i njegova pripadajuća karakteristika [1]

Tablica 4.2 Osnovni tehnički podaci motora [1]

	Vrijednost	Jedinica
Nazivna snaga	400	W
Nazivni moment	1,274	N · m
Maksimalni moment	3,822	N · m
Moment inercije	0,321	kg · m <sup>2</sup> · 10 <sup>4</sup>
Nazivna frekvencija vrtnje	300	min <sup>-1</sup>
Nazivna jakost struje	2,89	A <sub>RMS</sub>
Maksimalna učestalost vrtnje	5000	min <sup>-1</sup>
Rezolucija enkodera	3000	impulsa/okretaju
Konstanta momenta vrtnje motora ( $K_T$ )	0,46	N · m/A <sub>RMS</sub>
Naponska konstanta vrtnje motora ( $K_v$ )	29,5	V <sub>RMS</sub> /(min <sup>-1</sup> · 10 <sup>3</sup> )

## 4.2. Ispitni uzorak

Kako bi se izbjegla heterogenost strukture kostiju te promjenljiva debljina kortikalisa za potrebe ovog pokusa kosti su zamijenjene umjetnim biomehaničkim ispitnim materijalom. Ovakvi materijali su opće prihvaćeni materijali za vršenje ispitivanja bušenja kostiju kao zamjena za ljusku kost. Tako se dobiva ispitni uzorak homogenih svojstava i jednake debljine duž cijele ploče.

Ispitni uzorak je kompozitna ploča, ispunjena kratkim vlaknima, proizvedena od tvrtke *Sawbones Co* (slika 4.4). Tvrtka *Sawbones Co.* razvija, konstruira i proizvodi modele kostiju i mekog tkiva koji pomažu liječnicima da nauče i poboljšaju svoje vještine. Mješavina kratkih staklenih vlakana i epoksidne smole je ubrizgana oko jezgre poliuretanske pjene što predstavlja četvrtu generaciju modela kosti. [24]

Dimenzije ploče su 1300 x 180 x 6 mm. Najbitnija dimenzija, zbog dubine bušenja, je debljina ploče koja iznosi 6 mm.



Slika 4.4 Naručeni ispitni uzorak [24]

Podaci za modul elastičnosti, vlačnu čvrstoću i istežljivost materijala dobiveni su od proizvođača te su prikazani u tablici 4.3.

Tablica 4.3 Karakteristike ispitnog uzorka [24]

Tlačno opterećenje		Vlačno opterećenje		
Tlačna čvrstoća	Modul elastičnosti	Vlačna čvrstoća	Modul elastičnosti	Istežljivost
157 MPa	16,7 GPa	106 MPa	16 GPa	0,8 %

### 4.3. Ispitna svrdla

Za potrebe ovog pokusa korištena su 3 ispitna svrdla. Odabrana su Synthes svrdla 310.450 promjera 4,5 mm proizvođača *DePuy Synthes* (Švicarska). *DePuy Synthes* je tvrtka specijalizirana za izradu alata koji se primjenjuju u traumatologiji i ortopediji. Vršni kut svrdla iznosi 90°. Korišteno ispitno svrdlo prikazano je na slici 4.5.



**Slika 4.5 Synthes svrdlo 310.450**

U radu Klaić et al. [25] dokazano je da višestruki ciklusi sterilizacije alata značajno ne utječu na mehanička svojstva svrdla pa time niti na trošenje alata i stoga se sterilizacija neće uzimati u obzir u ovom pokusu.

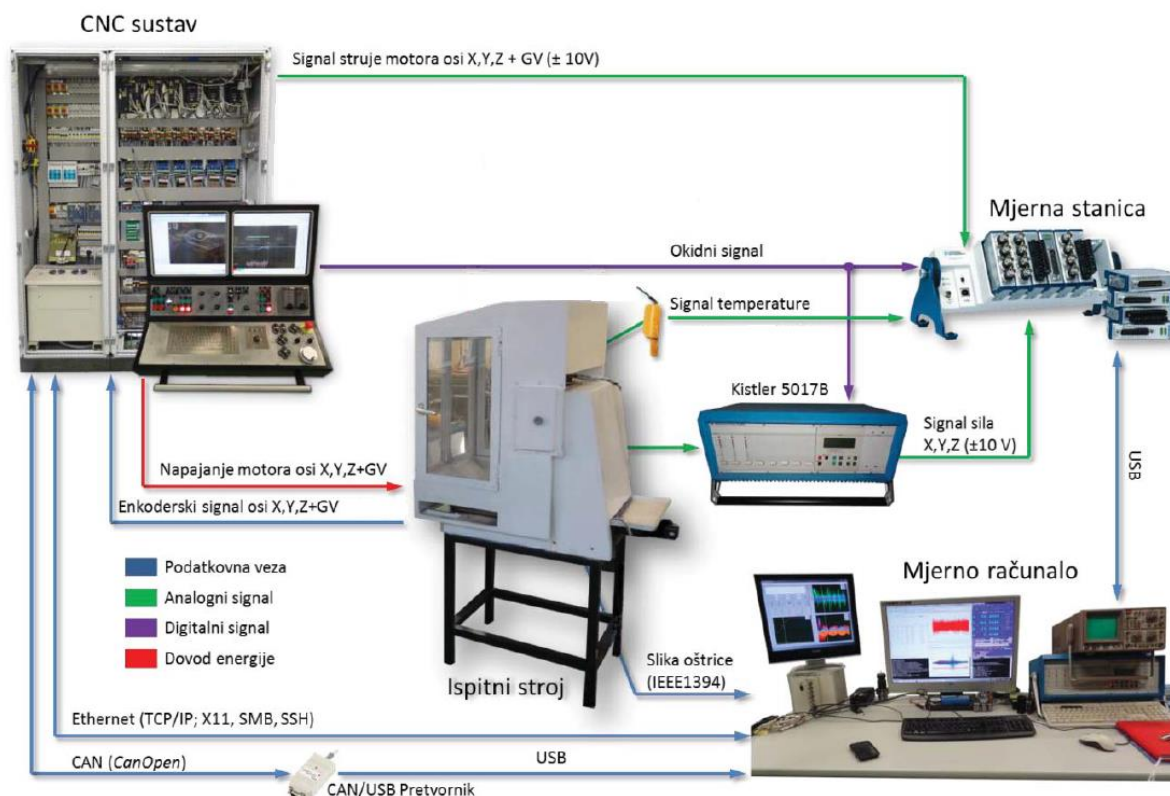
Svrdla su odrezana na potrebnu duljinu kako bi se mogla postaviti u ispitni stroj. Modificirana svrdla prikazana su na slici 4.6.



**Slika 4.6 Svrdlo prilagođeno eksperimentu**

#### 4.4. Mjerni sustavi

Za potrebe provođenja ovog pokusa ugrađeni su direktni i indirektni mjerni sustavi. Uz postojeći upravljački sustav stroja korišteno je i vanjsko računalo s prijenosnom mjernom stanicom. Slika 4.7 prikazuje shematski prikaz cijelog eksperimentalnog postava.



Slika 4.7 Shematski prikaz eksperimentalnog postava [1]

U radni prostor stroja ugrađeni su senzori za mjerenje sila rezanja (slika 4.2 – 6), industrijska kamera (slika 4.2 – 7) te termopar (slika 4.9) za mjerenje temperature ispitnog uzorka. Signali jakosti struja prikupljeni su iz odabranih servo-regulatora u sklopu CNC upravljačkog sustava.

##### 4.4.1. Mjerna stanica

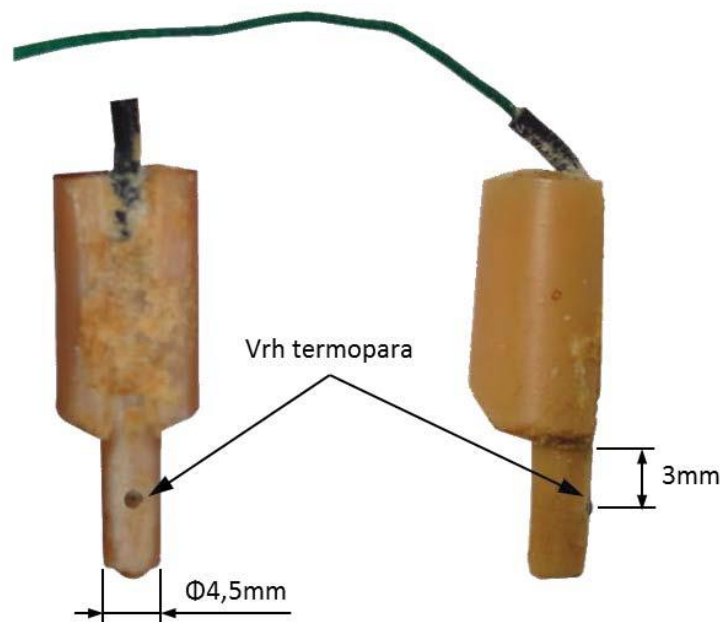
Osnovni dio vanjskog mjernog sustava je prijenosna modularna mjerna stanica tipa NI cDAQ-9178 (slika 4.8) proizvođača *National Instruments Co.* (SAD). Stanica se spaja na mjerno računalo putem USB veze, a s obzirom na primjenu u nju su ugrađeni odgovarajući moduli za akviziciju i izdavanje različitih signala. [1]



Slika 4.8 Mjerna stanica NI cDAQ-9178 [1]

#### 4.4.2. Senzor za temperaturu

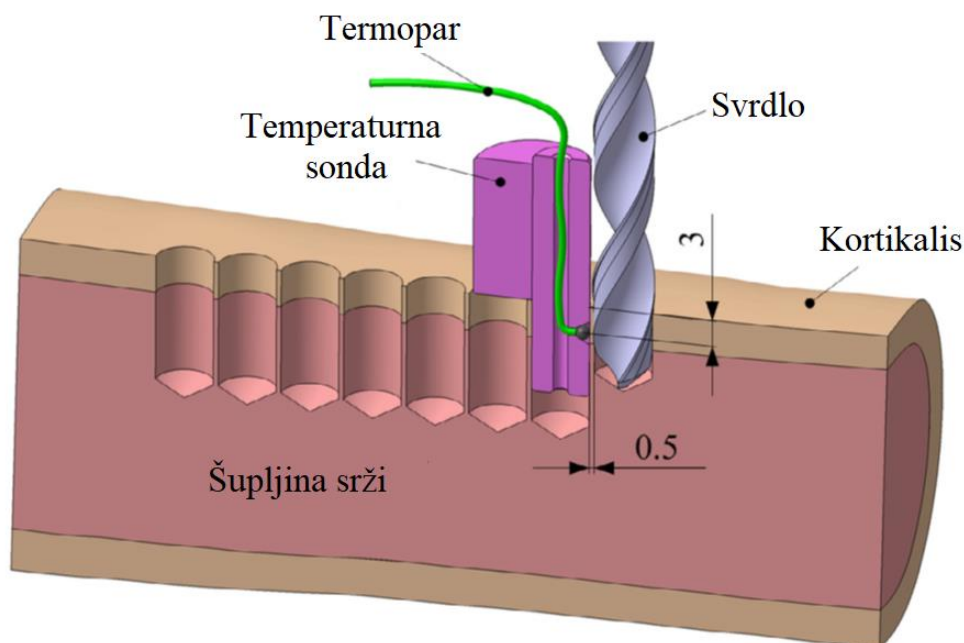
Termopar za mjerenje temperature ispitnog uzorka smješten je u posebno izrađeno kućište koje se sastoji iz dva međusobno spojena cilindrična dijela različitih promjera kao što je prikazano na slici 4.9. Termopar prolazi središtem oba dijela, a njegov vrh radijalno izlazi na užem dijelu. Uži dio, čiji promjer odgovara promjeru svrdla, umeće se u prethodno izrađen provrt tako da se vrh termopara usmjeri prema svrdlu, odnosno idućem provrtu. Širi dio kućišta osigurava vertikalni položaj termopara na dubini ispitnog uzorka od 3 mm. [1]



Slika 4.9 Senzor za mjerenje temperature [1]



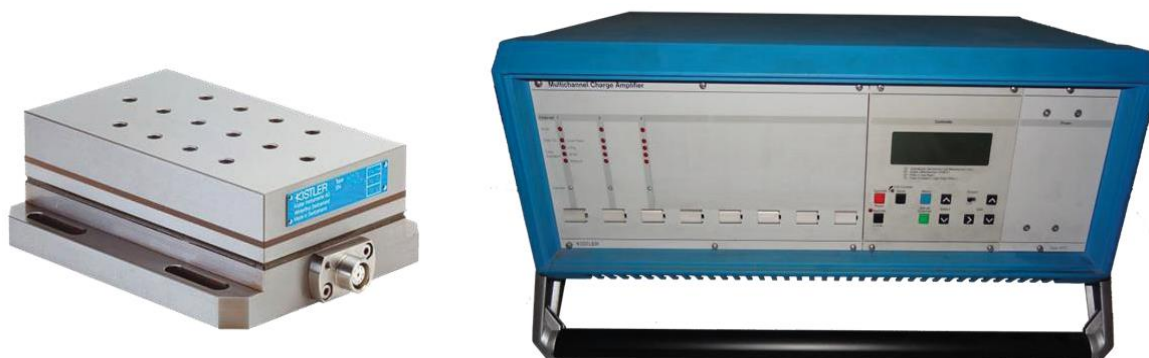
Najmanja debljina stijenke između dva provrta određuje se odgovarajućim NC programom i u svim provedenim pokusima bušenja iznosi 0,5 mm, a to je udaljenost koja se najčešće koristila u sličnim istraživanjima. Slika 4.10 prikazuje način postavljanja termopara u izbušene provrte kosti, tj. kortikalisa, a na isti je način bio korišten u ovom pokusu.



Slika 4.10 Položaj termopara tijekom bušenja [21]

#### 4.4.3. Senzor sila

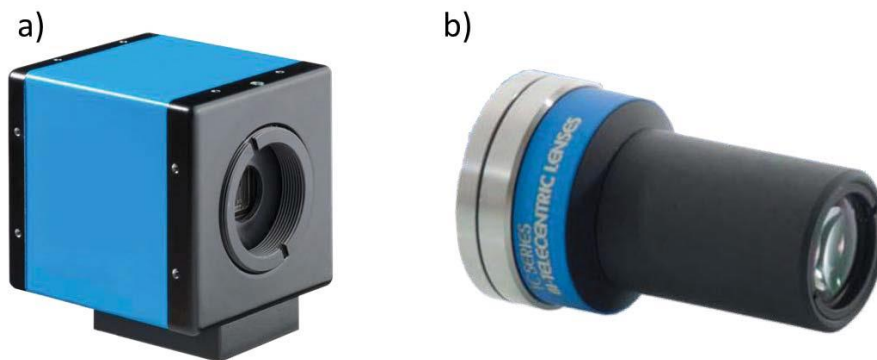
Signali sila rezanja prikupljeni su primjenom mjernog sustava sastavljenog od piezo-električnog tro-komponentnog senzora sila (tip 9257B) i odgovarajućeg nabojnog pojačala (tip 5017B) proizvođača *Kistler Holding AG* (Švicarska), slika 4.11. Senzor sila ugrađen je u sklopu stezne naprave na prigon X osi ispitnog stroja, a izlazni signali nabojnog pojačala istovremeno su snimani u sklopu mjernog i upravljačkog računala. [1]



Slika 4.11 Senzor sila (tip 9257B) s nabojnim pojačalom 5017B [1]

#### 4.4.4. Industrijska kamera

U eksperimentalni postav uključena je i industrijska kamera, proizvođača *Imaging Source Europe GmbH* (tip DMK41AF02), s telecentričnim objektivom, proizvođača *Opto Engineering S.r.l.* (tip TC2309), i rasvjetom. Kamera je korištena za slikanje oštrice svrdla s ciljem utvrđivanja istrošenosti oštrice alata, a prikazana je na slici 4.12.



Slika 4.12 Industrijska kamera DMK41AF02 a) s objektivom TC2309 b) [1]

Cjelokupni vizijski sustav s osvjetljenjem pričvršćen je na stol odgovarajućom steznom napravom (slika 4.13).

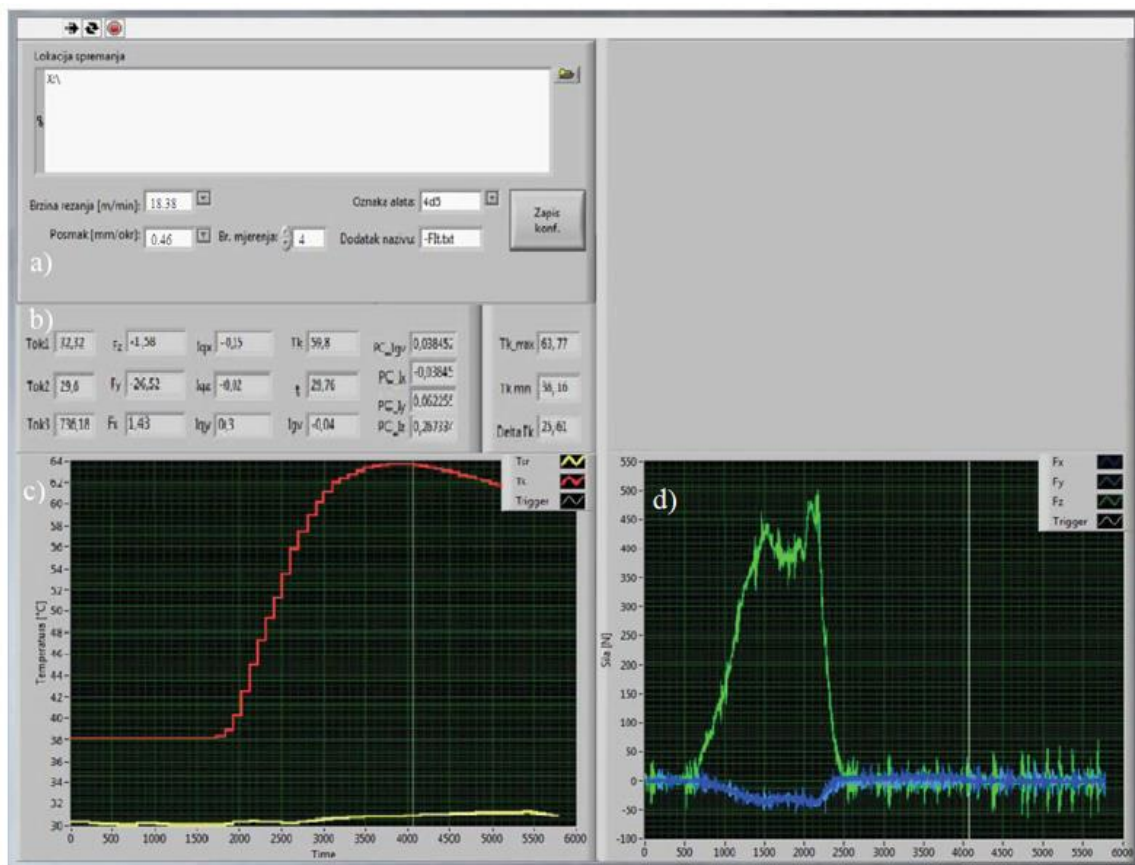


Slika 4.13 Industrijska kamera i svrdlo u poziciji za slikanje oštrice

#### 4.5. Programaska podrška mjernog sustava

Tijekom bušenja je uz CNC sustav istovremeno je korištena i mjerna aplikacija razvijena u sklopu LabView okruženja. Mjerna aplikacija (slika 4.14) je u eksperimentalnom dijelu istraživanja imala višeznačnu ulogu, a korištena je za:

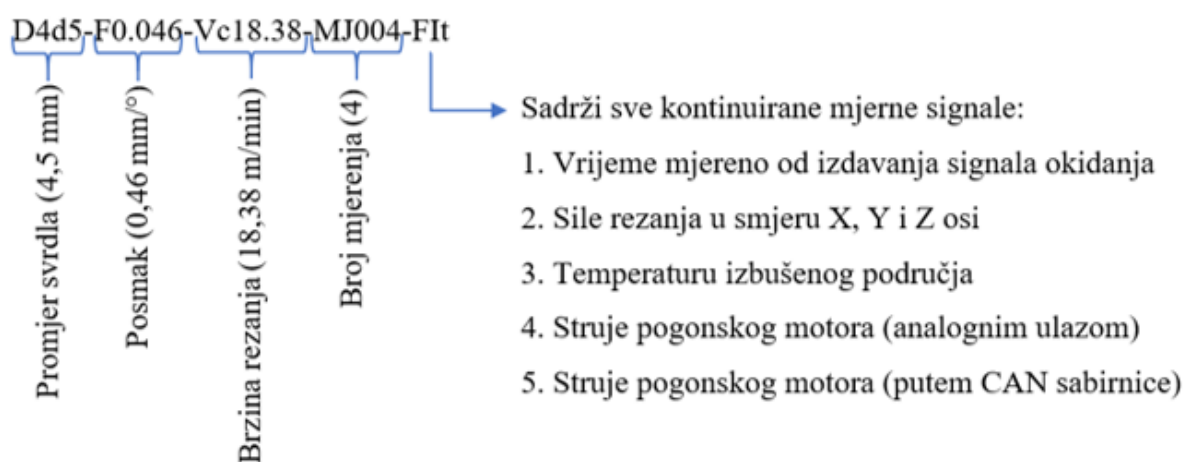
- zadavanje parametara stanja pokusa (parametara obrade) na osnovi kojih je generiran odgovarajući NC program (slika 4.14 – a);
- kontinuirano snimanje svih signala procesa obrade povezanih s mjernom stanicom i CAN sabirnicom (slika 4.14 – b);
- vizualnu i numeričku verifikaciju dobivenih rezultata (slika 4.14 – c, d i e);
- generiranje mjerne datoteke. [1]



- Određivanje parametara stanja pokusa
- Trenutne vrijednosti signala
- Prikaz odziva temperature izbušenog područja
- Prikaz sila rezanja

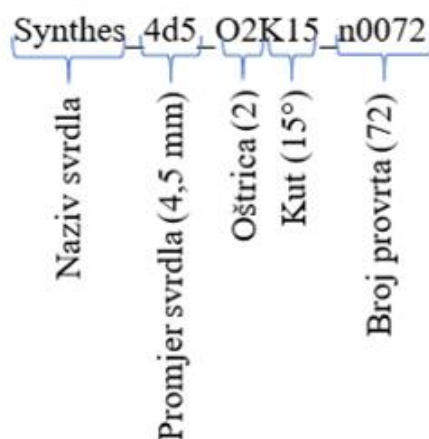
**Slika 4.14** Korisničko sučelje mjerne aplikacije

Rezultat jednog mjernog ciklusa je datoteka koja se odnosi na kontinuirane signale obrade snimljene mjernom stanicom, a njen način označavanja prikazan je primjerom na slici 4.15.



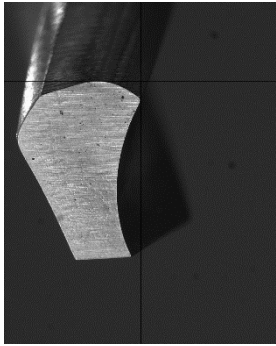
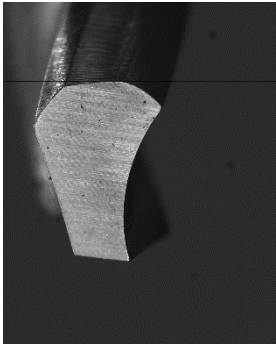
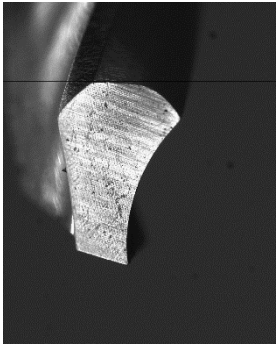
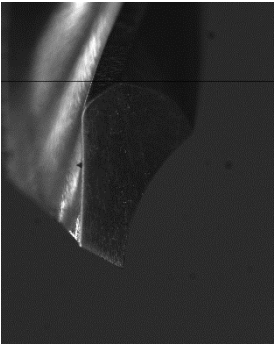
**Slika 4.15** Primjer mjerne datoteke nastale jednim ciklusom mjerenja

Slike oštrica svrdla uzimane su nakon određenog broja izbušenih provrta industrijskom kamerom te su se prikazivale i spremale na mjerno računalo. Rezultat jednog ciklusa slikanja su osam slika svrdla. Četiri slike predstavljaju slike prve oštrice (kut od 0°, 15°, 30° i 45°), dok se preostale četiri odnose na drugu oštricu slikanu pod istim kutovima. Na slici 4.16 dan je primjer označavanja jedne od osam slika nastale jednim ciklusom slikanja, a u tablici 4.4 primjer nastalih slika jedne od oštrica pod različitim kutovima.



**Slika 4.16** Primjer oznake jedne (1/8) slike svrdla nastale jednim ciklusom slikanja

Tablica 4.4 Primjer nastalih slika jedne oštrice jednim ciklusom slikanja

Kut slikanja			
0 °	15 °	30 °	45 °
			

## 5. MJERENJA I REZULTATI

Postoji puno čimbenika koji utječu na promjene temperature i potencijalnu pojavu termičke osteonekroze: mehaničke karakteristike i debljina kortikalisa kosti, konstrukcija i geometrija svrdla, nedovoljan efekt hlađenja, brzina rezanja, posmak i mnogi drugi. [21]

U ovom pokusu ograničava se na brzinu rezanja, posmak i alat istrošen na različite stupnjeve istrošenosti. Cilj pokusa je bušenjem ploče, koja je svojstvima slična kostima, istražiti utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti alata na sile rezanja i temperaturu bušenja. Pri tome su korištene dvije kombinacije parametara obrade. Prva kombinacija odgovara niskobrzinskim parametrima obrade koji otprilike odgovaraju parametrima koje trenutno koriste kirurzi tijekom operacije, a druga visokobrzinskim koji bi trebao biti povoljniji pri bušenju kostiju.

Na temelju prijašnjih istraživanja pretpostavljeno je da će visokobrzinska obrada rezultirati manjim porastom temperature u zoni obrade, što bi doprinijelo smanjenju nastanka termičke osteonekroze kod bušenja kostiju. Iako se većim brzinama rezanja brže troši oštrica alata, sama obrada puno kraće traje što bi trebalo doprinijeti manjem povećanju temperatura unutar izbušenog područja kosti.

U ovom poglavlju detaljno je opisan postupak bušenja ispitnog uzorka te su prikazani dobiveni rezultati.

## 5.1. Plan pokusa

Za potrebe ovog pokusa korištene su dvije kombinacije parametara obrade:

- niskobrzinska
  - brzine rezanja  $v_c = 18,38$  m/min (1300 okr/min),
  - posmak  $f = 0,46$  mm/okr;
- visokobrzinska
  - brzina rezanja  $v_c = 66,44$  m/min (4700 okr/min),
  - posmak  $f = 0,38$  mm/okr.

Naglasak bi se mogao staviti na upotrebu brzine rezanja kao pojam za visokobrzinsku ili niskobrzinsku obradu jer brzina rezanja, za razliku od frekvencije vrtnje, uzima u obzir i promjer svrdla, što omogućuje kvalitetniju usporedbu rezultata između svrdla različitog promjera. Međutim, većina istraživača koristi pojam frekvencija vrtnje kao parametar brzine. Navedeni posmaci su odabrani jer oni otprilike rezultiraju silama koje je moguće ostvariti ljudskom rukom. „Niskobrzinski“ broj okretaja (1300 okr/min) predstavlja trenutno korišten broj okretaja na ručnim bušilicama za bušenje kostiju, dok „visokobrzinski“ (4700 okr/min) predstavlja broj okretaja koji bi bio prikladniji ako se dokaže da je povoljniji za bušenje kostiju. Tim režimima se žele simulirati stvarna, a i moguća situacija tijekom operacije.

U pokusu su korištena tri svrdla. Kako bi se svrdla prilagodila za potrebe provođenja eksperimenta, prije obrade bušenjem odrezana su na potrebnu duljinu te su oštrice alata slikane u cilju određivanja početnog stanja. Slika 5.1 prikazuje kako izgleda slikanje oštrica svrdla.



Slika 5.1 Slikanje oštrice

Provrta su tijekom izvođenja pokusa bušeni izravno, bez prethodnog predbušenja ili zabušivanja. Hod svrdla u smjeru posmičnog gibanja iznosio je 20 mm s ciljem osiguravanja potpunog prolaza svrdla kroz uzorak. Uzorak je stegnut u ispitni stroj odgovarajućom steznom napravom.

Nakon umetanja svakog svrdla u ispitni stroj, svrdlo je pozicionirano u željeni položaj na uzorku. Nakon svakog bušenja svrdlo je zamaknuto u poziciju za sljedeće bušenje. Razmaci između dva susjedna provrta birani su tako da najtanja debljina stijenke iznosi 0,5 mm, tj. da udaljenost između središta dvaju provrta iznosi 5 mm. Prije idućeg ciklusa bušenja svrdlo je hlađeno kako bi došlo na željenu temperaturu (~ 24 do 27 °C) prije sljedećeg mjerenja.

Svakim svrdlom izbušeno je 150 provrta te su se nakon određenog broja provrta slikale oštrice kako bi se utvrdila istrošenost oštrica svrdla. Tijekom jednog ciklusa slikanja, pokrenut je NC program slikanja u kojem je prvo zatvorena regulacijska petlja glavnog vretena po poziciji (C os), a zatim je za svaku reznu oštricu svrdla uzimano nekoliko slika pri različitim pozicijama C osi u odnosu na prethodno postavljenu nul-točku (0°, 15°, 30° i 45°).

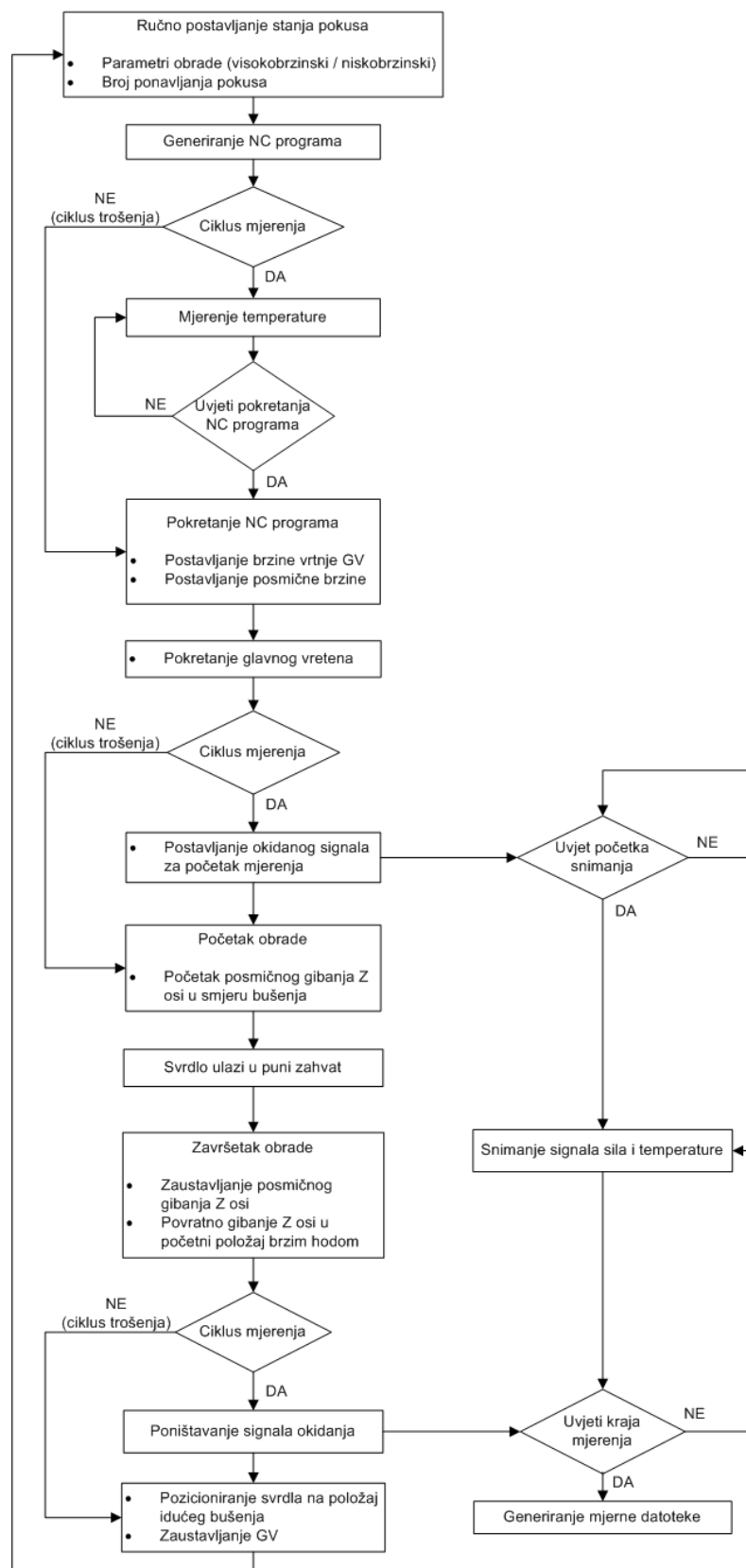
### **5.1.1. Svrdlo broj 1**

S prvim svrdlom koristila se kombinacija niskobrzinskih i visokobrzinskih parametara obrade. Tako se dobivaju svi potrebni podaci predviđeni pokusom, s gotovo jednakim stupnjem istrošenosti oštrice alata između dva provrta. S ovim svrdlom mjerili su se podaci predviđeni pokusom: temperatura, sile rezanja i istrošenost oštrice alata.

Nakon početnog slikanja oštrice u prethodno izrađen provrt postavljen je senzor za mjerenje temperature (termopar) te je izvršeno bušenje i mjerenje niskobrzinskom obradom. To je bilo prvo mjerenje niskobrzinskog režima. Nakon toga, senzor temperature se pomiče za jedno mjesto dalje (u prethodno napravljen provrt). Na tom se mjestu buši sljedeći provrt visokobrzinskim režimom i mjere se podaci predviđeni pokusom. Potom slijede dva bušenja niskobrzinskim parametrima zbog trošenja alata.

Niskobrzinski režim se koristio za trošenje alata, između dva mjerenja, jer taj režim najbliže odgovara eksploatacijskim uvjetima. Nakon ta dva provrta slijedi bušenje niskobrzinskim režimom i njegovo ponovno mjerenje te zatim visokobrzinsko bušenje i mjerenje te se tako postupak ponavlja do kraja pokusa. Proces bušenja prvim svrdlom prikazan je dijagramom toka na slici 5.2.





Slika 5.2 Dijagram toka izvođenja bušenja prvim svrdlom

Drugo slikanje oštrice odvalo se nakon četvrtog bušenja, treće slikanje nakon osmog, četvrto nakon šesnaestog te nadalje nakon svakog osmog bušenja. Slikanje oštrice bilo je učestalije na početku zbog povećanog trošenja.

Tablicom 5.1 prikazan je način bušenja, mjerenja (temperature, sile rezanja) i slikanja oštrice kako bi se jednostavnije shvatio tijek pokusa prvim svrdlom. Brojevi u tablici predstavljaju redni broj izbušenog provrta. Položaj simbola za slikanje oštrice u odnosu na broj izbušenog provrta određuje je li slikanje izvršeno prije ili poslije bušenja.

**Tablica 5.1 Postupak bušenja prvim svrdlom**


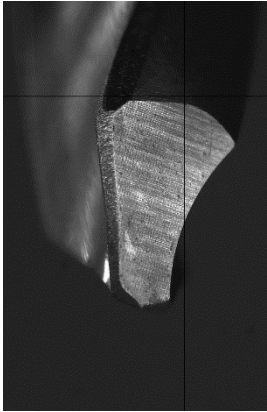
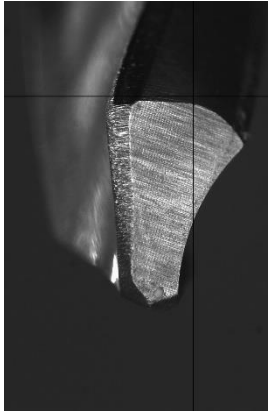
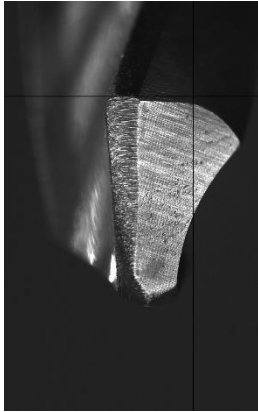
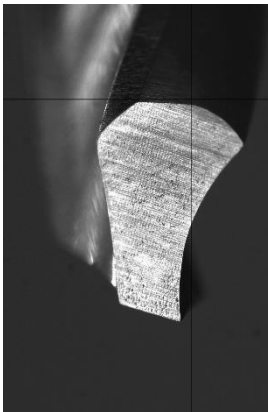
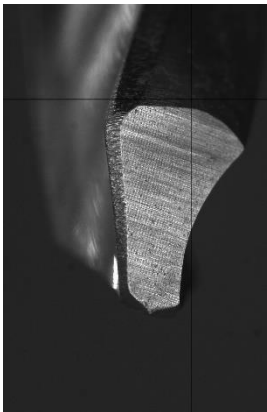
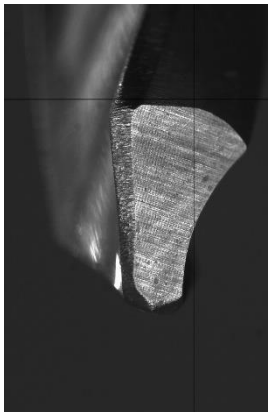
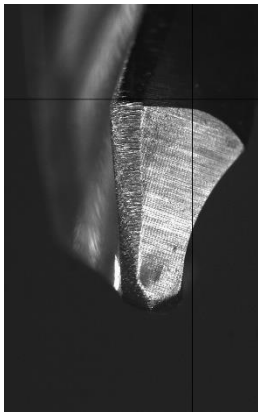

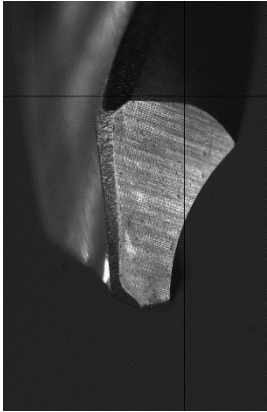
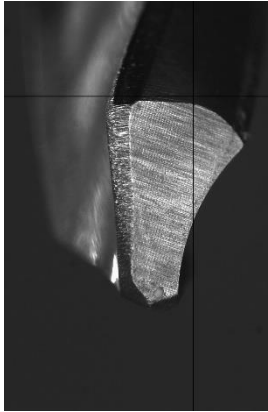
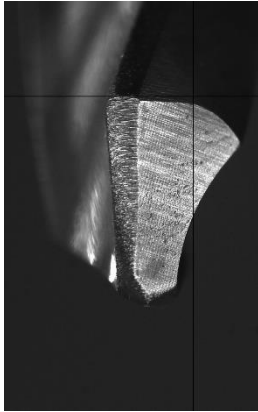
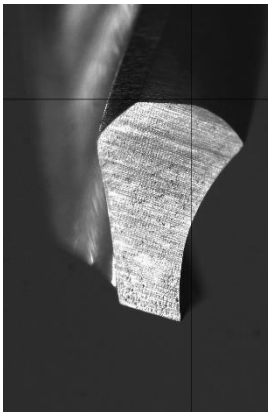
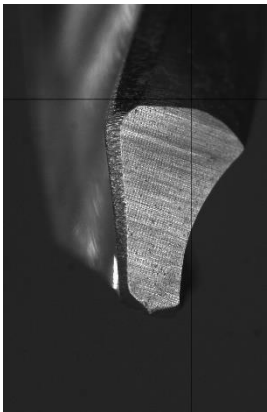
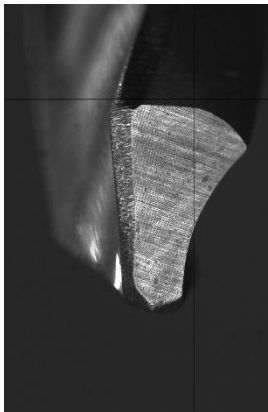
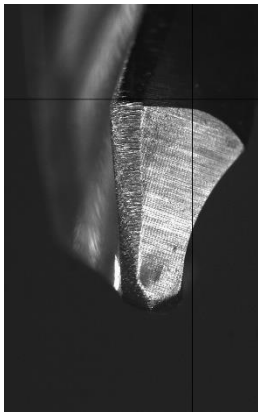
●1▼■	2▲■	3▼	4▼●	5▼■	6▲■	7▼	8▼●	9▼■	10▲■
11▼	12▼	13▼■	14▲■	15▼	16▼●	17▼■	18▲■	19▼	20▼
21▼■	22▲■	23▼	24▼●	25▼■	26▲■	27▼	28▼	29▼■	30▲■
31▼	32▼●	33▼■	34▲■	35▼	36▼	37▼■	38▲■	39▼	40▼●
41▼■	42▲■	43▼	44▼	45▼■	46▲■	47▼	48▼●	49▼■	50▲■
51▼	52▼	53▼■	54▲■	55▼	56▼●	57▼■	58▲■	59▼	60▼
61▼■	62▲■	63▼	64▼●	65▼■	66▲■	67▼	68▼	69▼■	70▲■
71▼	72▼●	73▼■	74▲■	75▼	76▼	77▼■	78▲■	79▼	80▼●
81▼■	82▲■	83▼	84▼	85▼■	86▲■	87▼	88▼●	89▼■	90▲■
91▼	92▼	93▼■	94▲■	95▼	96▼●	97▼■	98▲■	99▼	100▼
101▼■	102▲■	103▼	104▼●	105▼■	106▲■	107▼	108▼	109▼■	110▲■
111▼	112▼●	113▼■	114▲■	115▼	116▼	117▼■	118▲■	119▼	120▼●
121▼■	122▲■	123▼	124▼	125▼■	126▲■	127▼	128▼●	129▼■	130▲■
131▼	132▼	133▼■	134▲■	135▼	136▼●	137▼■	138▲■	139▼	140▼
141▼■	142▲■	143▼	144▼●	145▼■	146▲■	147▼	148▼	149▼■	150▲■●

Simbol	Značenje
▼	Niskobrzinsko bušenje
▲	Visokobrzinsko bušenje
■	Mjerenje temperature i sila rezanja
●	Slikanje oštrice

Ukupan broj mjerenja temperatura i sila rezanja je 76, od toga je 38 mjerenja za niskobrzinsku obradu, a 38 za visokobrzinsku.

U tablici 5.2 prikazane su uzimane slike obje oštrice (kut od 30°) prije bušenja, nakon 40 izbušenih provrta, nakon 80 izbušenih provrta te na kraju, nakon 150 izbušenih provrta.

Tablica 5.2 Slike oštrica svrdla 1 nakon određenog broj izbušenih provrta

		Broj izbušenih provrta			
		0	40	80	150
Oštrica 1					
					
					
					

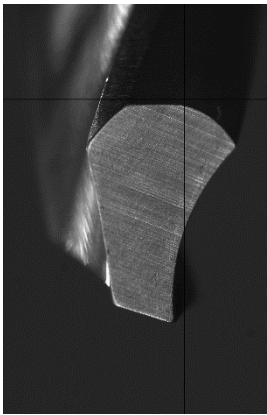
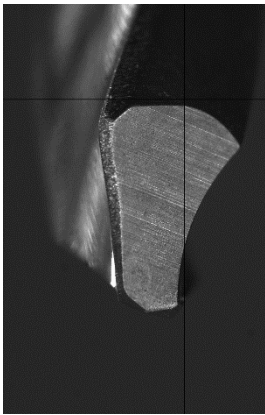
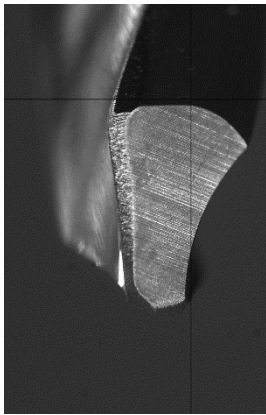
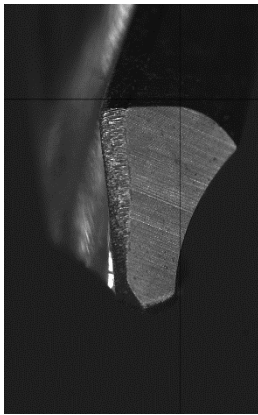
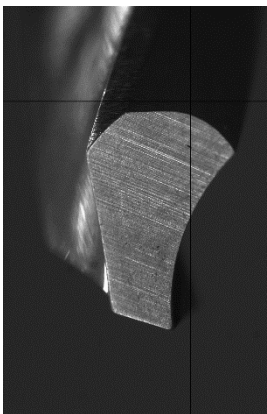
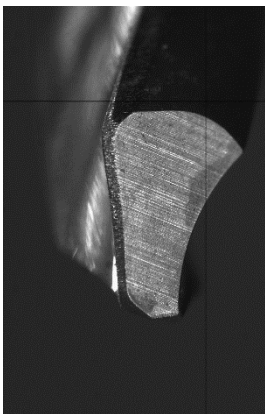
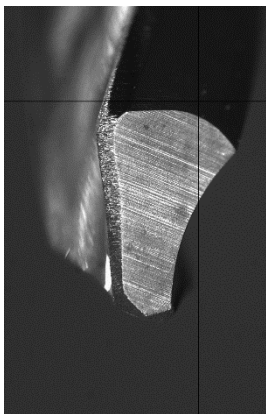
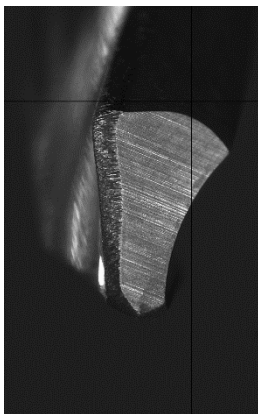
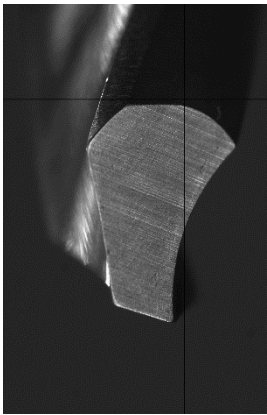
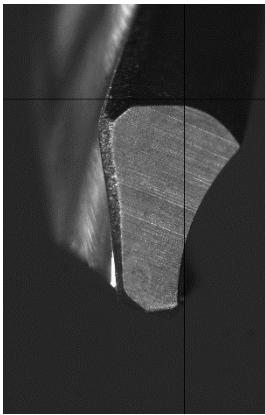
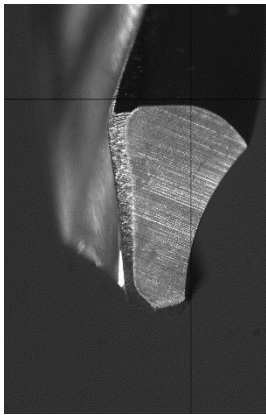
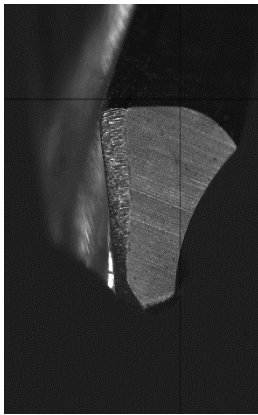
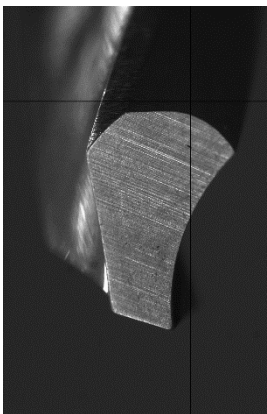
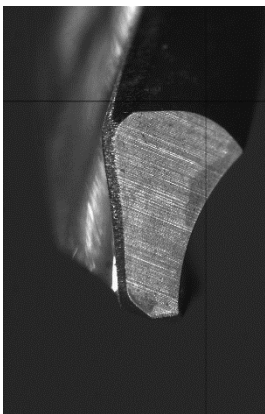
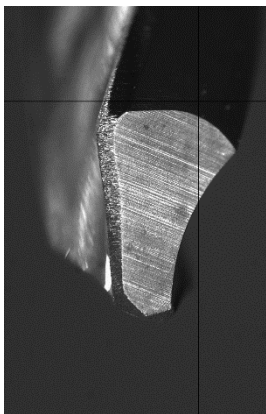
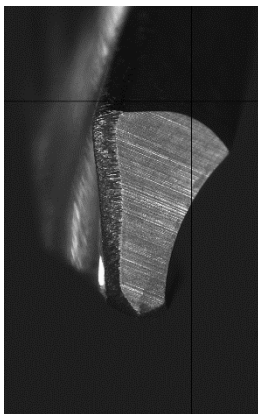
Naime, povećanje stupnja istrošenosti s porastom broja izbušenih provrta je evidentno. Međutim, usporedba prve i druge glavne oštrice ne pokazuje značajna odstupanja u trošenju između oštrica.

### 5.1.2. Svrđlo broj 2

Bušenje drugog i trećeg svrdla izvelo se s ciljem dobivanja krivulja trošenja za pojedini režim. Drugim svrdlom izbušilo se također 150 provrta i to niskobrzinskim režimom.

Mjerenja temperature i sila rezanja nisu se obavljala, ali su se slikale oštrice svrdla na sličan način kao kod prvog. Prvo slikanje obavljeno je prije prvog bušenja, drugo nakon pet izbušenih provrta, treće nakon deset provrta, četvrto nakon dvadeset provrta te nadalje nakon svakog desetog provrta. I u ovom je slučaju bilo učestalije slikanje na početku zbog većeg trošenja oštrice. U tablici 5.3 prikazane su slike obje oštrice (kut od 30°) prije bušenja, nakon 40 izbušenih provrta, nakon 80 izbušenih provrta te nakon 150 izbušenih provrta.

Tablica 5.3 Slike oštrica svrdla 2 nakon određenog broj izbušenih provrta

		Broj izbušenih provrta			
		0	40	80	150
Oštrica 1					
					
					
					

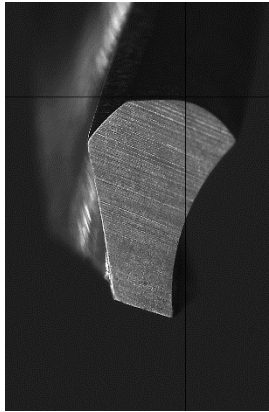
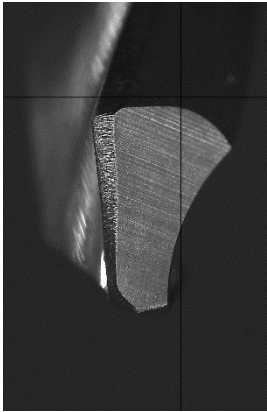
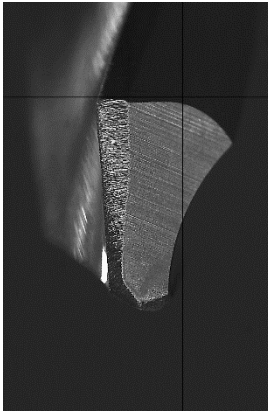
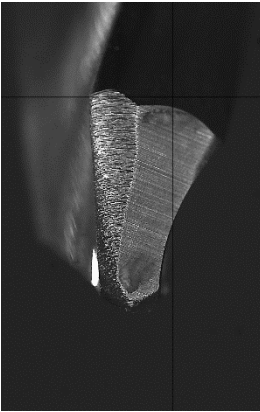
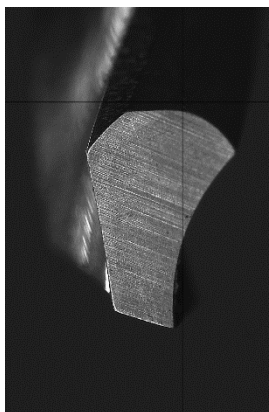
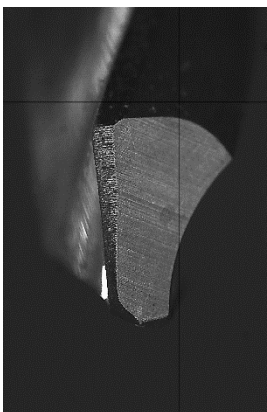
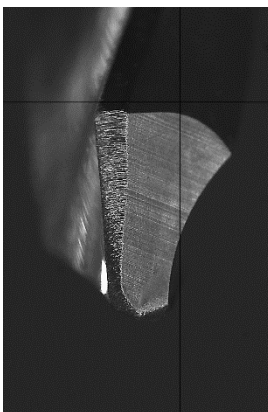
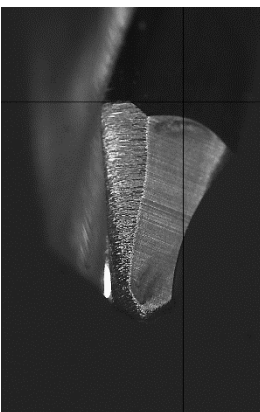
Ponovno, kao i kod prvog svrdla, može se zaključiti da je trošenje oštrica poprilično ujednačeno.

### 5.1.3. Svrđlo broj 3

Postupak bušenja i slikanja bio je isti kao kod drugog svrdla samo s visokobrzinskim režimom.

U tablici 5.4 prikazane su uzimane slike obje oštrice (kut od 30°) prije bušenja, nakon 40 izbušenih provrta, nakon 80 izbušenih provrta i nakon 150 izbušenih provrta.

**Tablica 5.4 Slike oštrica svrdla 3 nakon određenog broj izbušenih provrta**

		Broj izbušenih provrta			
		0	40	80	150
Oštrica 1					
					

Ovdje se naime, već na samim slikama vidi daleko veće trošenje oštrice pri većim brzinama rezanja u odnosu na manje, kao što je i očekivano.

S obzirom na to da je kod svih režima obrade, tj. kod sva tri svrdla, trošenje između oštrica svrdla jednako, nadalje će se razmatrati samo trošenje jedne od oštrica.

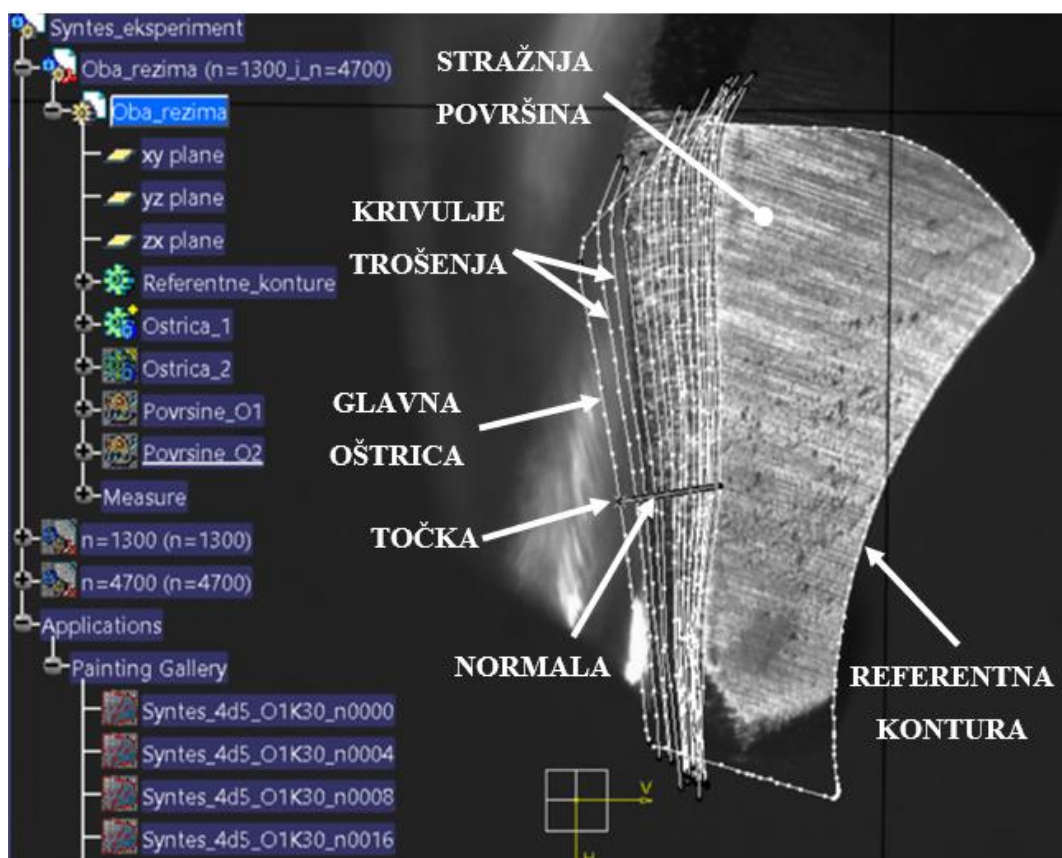
## 5.2. Rezultati pokusa

Nakon obavljenog pokusa dobiveni su mjerni podaci temperatura i sila rezanja s obzirom na dinamiku trošenja oštrice alata. Postupak dobivanja parametara trošenja alata detaljno je opisan je u sljedećem potpoglavlju, a u ostalim potpoglavljima dan je prikaz dobivenih mjernih podataka.

### 5.2.1. Trošenje oštrice alata

Programski paket CATIA V5R21 korišten je za analizu slikovnih podataka. Analiza je provedena ručno u nekoliko koraka, a uzimane su slike oštrica pod kutom od 30°.

U modulu „Sketch Tracer“ dodane su slike početnih stanja oštrica te su im dodani koordinatni sustavi, a zatim su rubne konture reznih oštrica ručno ocrtane. Iscrtane konture predstavljaju referentne konture. U odnosu na njih, sve se daljnje slike orijentiraju i pozicioniraju. Nakon postavljanja referentnih kontura, redom su dodavane slike trošenja oštrice te su se rubovi zone trošenja ručno iscrtavali tvoreći tako krivulje koje predstavljaju trošenje stražnje površine nakon određenog broja bušenja (slika 5.3).

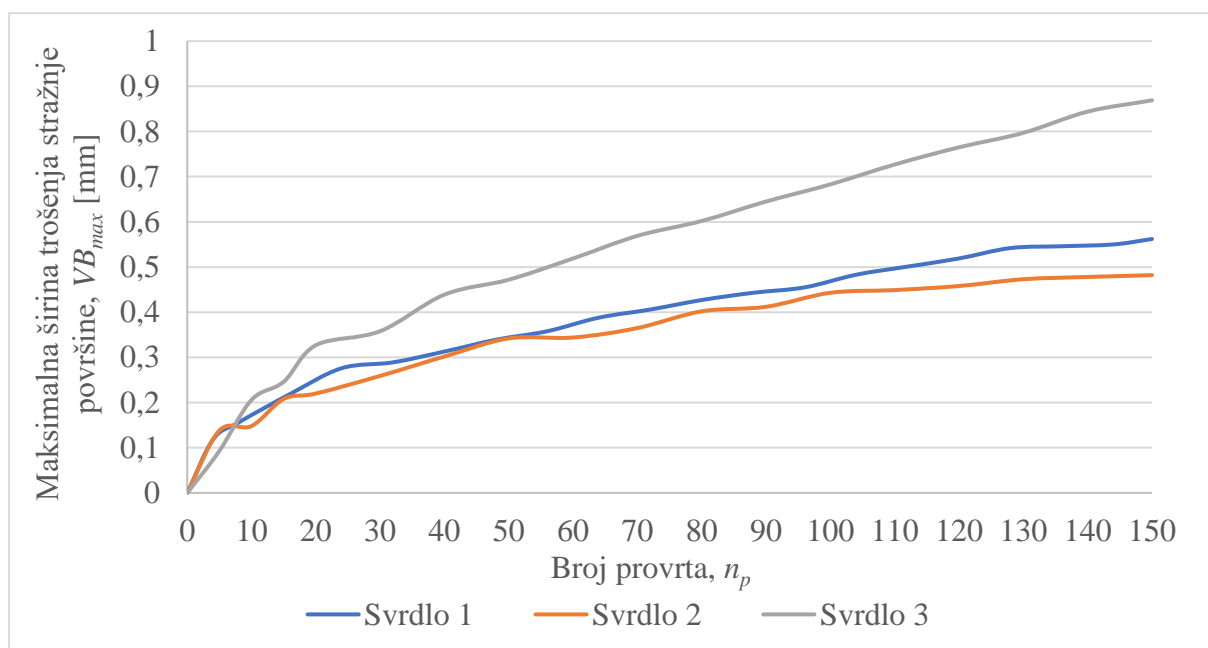


Slika 5.3 Određivanje parametara za trošenje oštrice alata

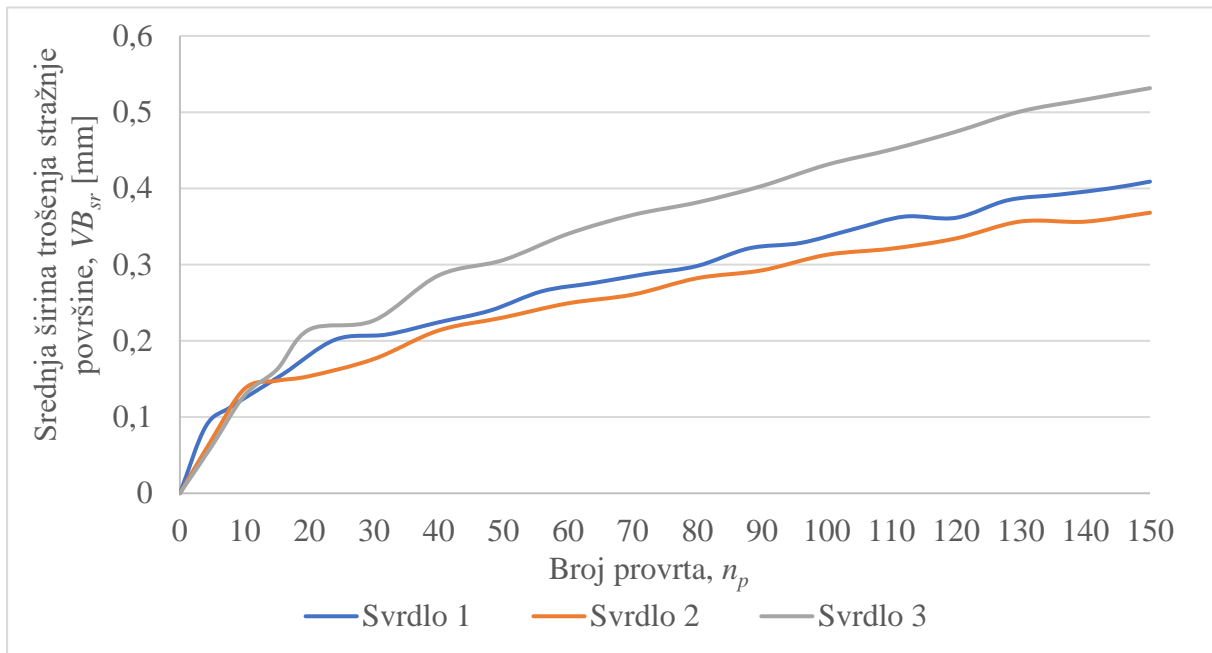
Dalje se uvodi točka na glavnoj oštrici. Iz te točke su povučene normale od početne krivulje do svake sljedeće krivulje. One predstavljaju širinu trošenja stražnje površine (VB), a mijenjanjem položaja točke duž cijele glavne oštrice dobiva se niz širina ovisno o položaju točke na glavnoj oštrici.

Nakon iscertavanja svih kontura, primijenjen je modul „*Product Engineering Optimizer*“ u kojem se zamicanjem i očitavanjem duljina normala višestrukim koracima od vrha svrdla formirala mjerna datoteka pomoću naredbe „*Design of Experiments*“.

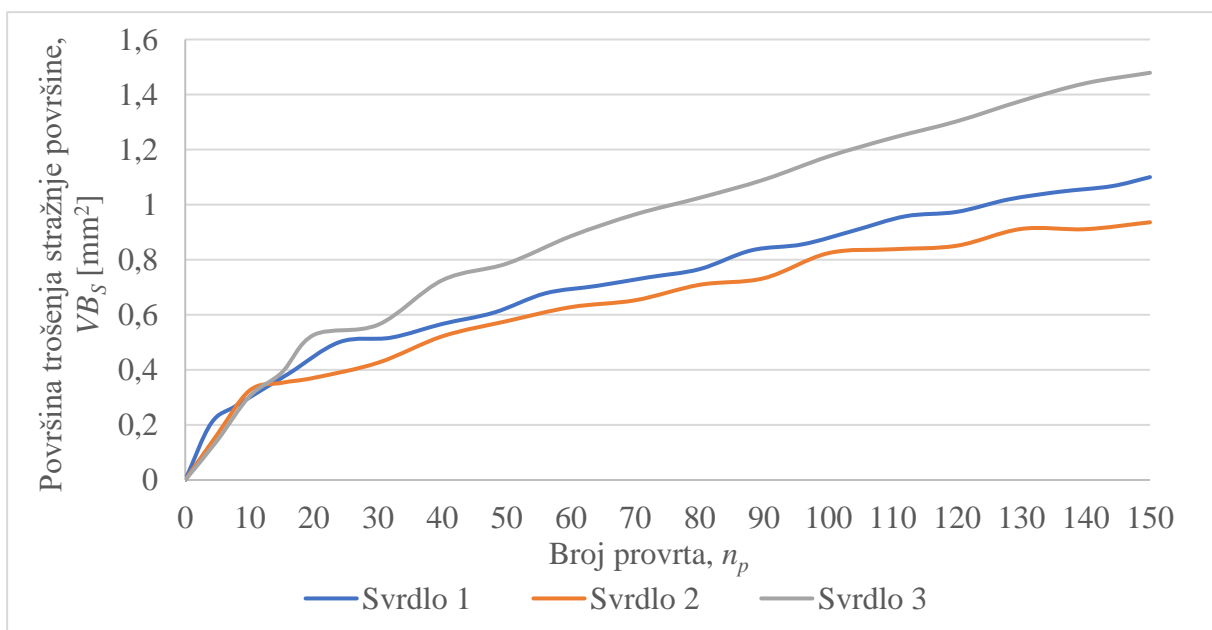
Parametri trošenja stražnje površine alata izračunati su za svako svrdlo i za obje glavne oštrice. Izračunata je maksimalna širina trošenja stražnje površine ( $VB_{max}$ ), srednja širina trošenja stražnje površine ( $VB_{sr}$ ) te površina trošenja stražnje površine ( $VB_S$ ). U dijagramima na slikama 5.4, 5.5 i 5.6 prikazani su podaci za jednu od oštrica, obzirom da nema značajnih razlika u trošenju između oštrica pojedinog svrdla.



**Slika 5.4** Maksimalna širina trošenja stražnje površine oštrice



Slika 5.5 Srednja širina trošenja stražnje površine oštrice



Slika 5.6 Površina trošenja stražnje površine oštrice

Kao što je pretpostavljeno već prema samim slikama oštrice, daleko je veće trošenje kod trećeg svrdla, dok je najmanje kod drugog. Prvo svrdlo s kombiniranim parametrima obrade našlo se između te dvije krivulje trošenja, ali bliže krivulji trošenja drugog svrdla, odnosno



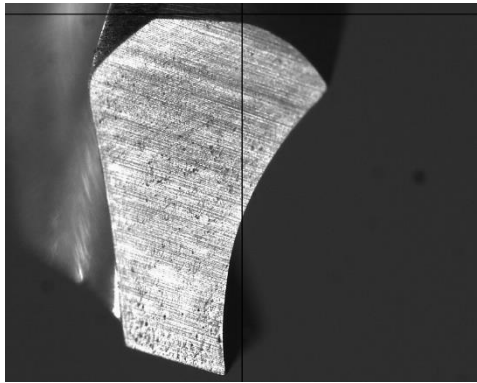
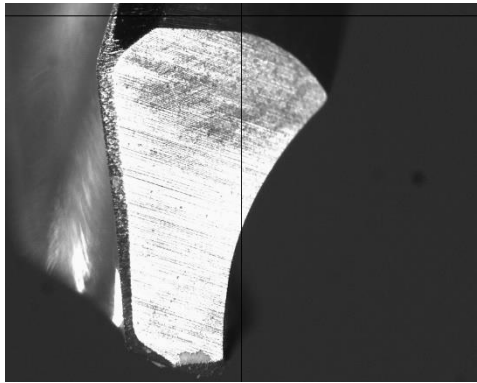

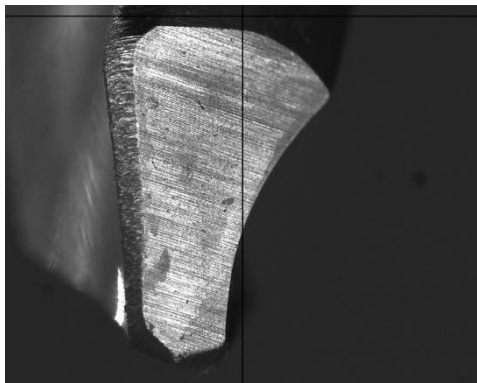
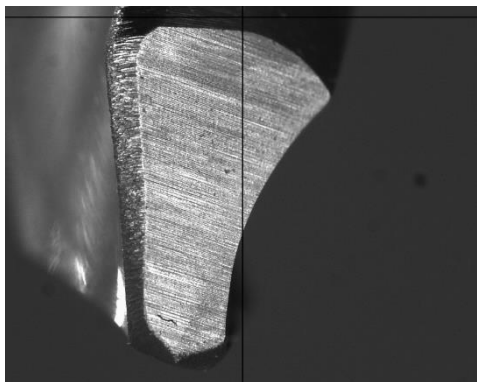
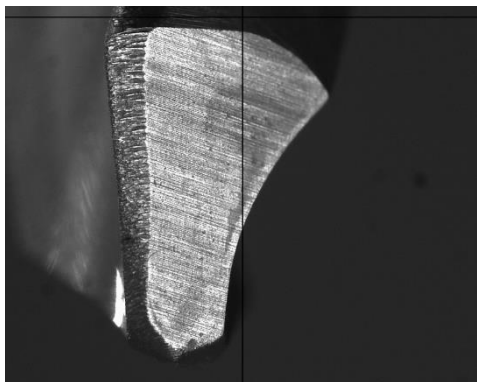
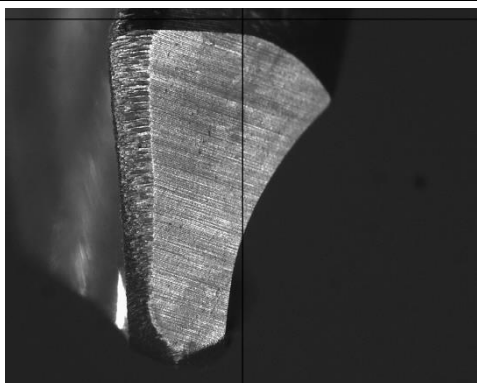
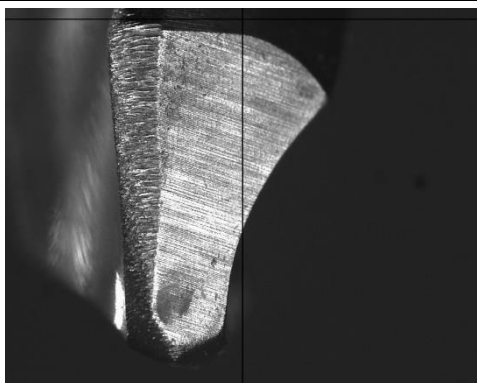
krivulji niskobrzinske obrade. Rezultati prvog svrdla nisu iznenađujući s obzirom na to da se većina obrade, tj. trošenje svrdla između dva mjerenja, odvijala s niskobrzinskom obradom.

Stupanj istrošenosti klasificiran je u četiri kategorije ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  i  $S_4$ ) prema parametru maksimalne širine trošenja stražnje površine svrdla broj 1. Prva kategorija ( $S_1$ ) odnosi se na područje u kojem se svrdlo može smatrati potpuno oštrim, druga ( $S_2$ ) na područje istrošenosti alata većeg od prve kategorije a manje od treće, treća ( $S_3$ ) na područje istrošenosti većeg od  $S_2$ , a manje od posljednje kategorije ( $S_4$ ), dok se posljednja kategorija ( $S_4$ ) odnosi na područje najvišeg razmatranog stupnja istrošenosti. U tablici 5.5 dane su vrijednosti maksimalne širine trošenja stražnje površine alata za svaki stupanj istrošenosti, a u tablici 5.6 početni i konačni izgled oštrice za svaki stupanj istrošenosti svrdla 1.

**Tablica 5.5 Područja maksimalne širine trošenja stražnje površine svrdla broj 1 s obzirom na stupanj istrošenosti**

	Stupanj istrošenosti	Područje		Jedinica	Broj izbušenih provrta	Broj mjerenja temperatura i sila za svaki režim unutar područja
		Početno stanje	Konačno stanje			
$VB_{max}$	$S_1$	0	0,22	mm	0-16	4
	$S_2$	0,22	0,36		17-56	10
	$S_3$	0,36	0,46		57-96	10
	$S_4$	0,46	0,56		97-150	14

Tablica 5.6 Početni i konačni oblik trošenja prema stupnju istrošenosti

Stupanj istrošenosti	Početno stanje	Konačno stanje
S <sub>1</sub>		
S <sub>2</sub>		
S <sub>3</sub>		
S <sub>4</sub>		

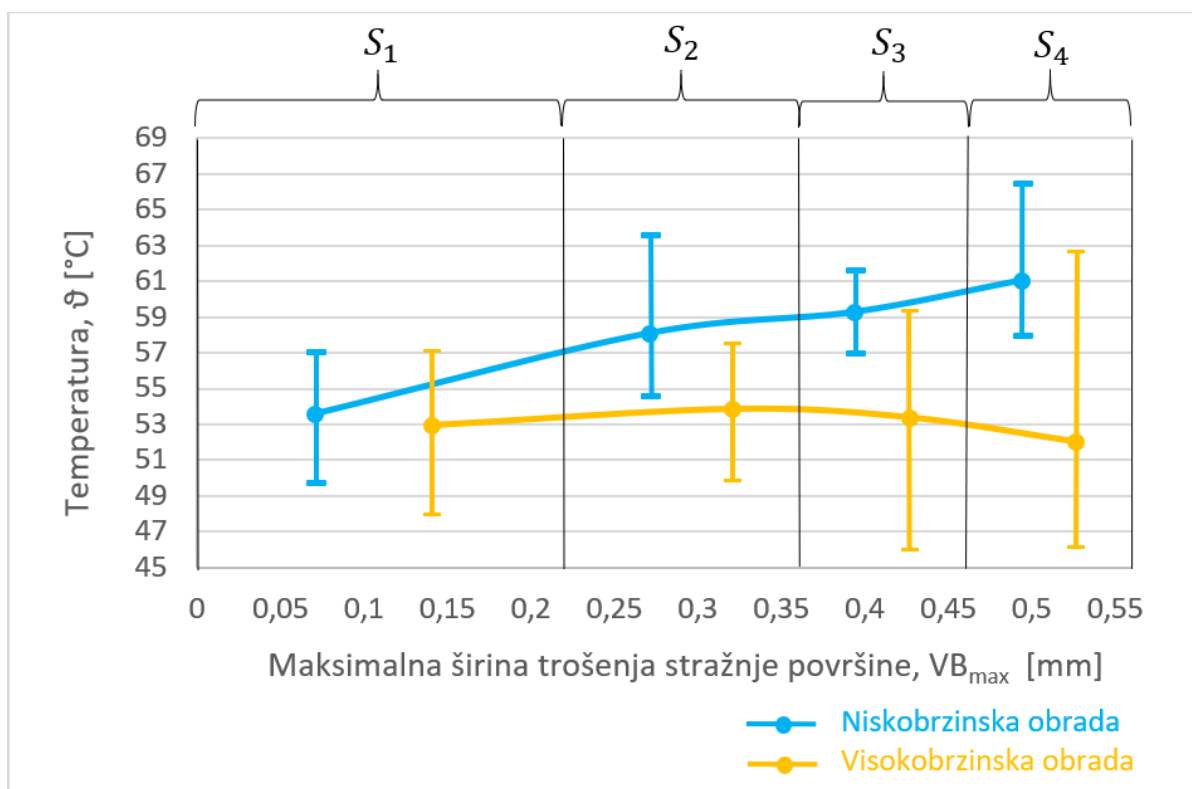
### 5.2.2. Temperatura

Temperature u ovisnosti o vremenu trajanja bušenja dobivene su senzorom za mjerenje temperature, odnosno termoparom. Ukupan broj mjerenja temperatura za pojedini režim obrade iznosi 38. Od svih izmjerenih temperatura za svako mjerenje izdvojene su one maksimalne. Maksimalne temperature podijeljene su u kategorije prema stupnju istrošenosti alata (tablica 5.5). Za svaku kategoriju određena je maksimalna, minimalna i prosječna vrijednost temperatura, a prikazane su u tablici 5.7.

**Tablica 5.7 Maksimalne, minimalne i prosječne vrijednosti temperatura podijeljene prema stupnju istrošenosti**

		Režim obrade	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
Temperatura, $\vartheta$ [°C]	Maksimalna vrijednost	Niskobrzinski	57,24	63,71	61,77	66,65
		Visokobrzinski	57,23	57,62	59,44	62,76
	Minimalna vrijednost	Niskobrzinski	49,91	54,75	57,14	58,13
		Visokobrzinski	48,12	49,99	46,11	46,28
	Prosjeak svih vrijednosti	Niskobrzinski	53,60	58,10	59,29	61,05
		Visokobrzinski	52,98	53,88	53,42	52,08

Slika 5.7 prikazuje dijagram temperature u ovisnosti o maksimalnoj širini trošenja stražnje površine alata s podjelom prema stupnjevima istrošenosti alata. Gornje crtice predstavljaju maksimalne vrijednosti temperatura za svaki stupanj istrošenost, a donje crtice minimalne vrijednosti. Kroz prosječne vrijednosti provučena je linija od prvog stupnja istrošenosti alata do posljednjeg.



Slika 5.7 Dijagram temperatura – maksimalna širina trošenja stražnje površine

Kao što je već spomenuto u radu, temperatura koja prelazi 42 °C uzrokuje poremećaj metabolizma kosti, a temperatura iznad 47 °C tijekom 1 minute izaziva ireverzibilne promjene građe i funkcije kosti. Skoro sve izmjerene vrijednosti maksimalne temperature su iznad 42 °C, stoga prema ovim spoznajama moglo bi se zaključiti da će doći do oštećenja kosti. No u ovom istraživanju korišten je biomehanički umjetni materijal koji, za razliku od pravih kosti, nema prirodnu vlažnost koja pridonosi hlađenju. Također, tijekom postupka bušenja nije korišteno nikakvo rashladno sredstvo kao što je to uobičajeno.

Iako su temperature prekoračile dozvoljenu granicu, hipoteza rada je potvrđena. Visokobrzinska obrada se pokazala povoljnijom u procesu bušenja kostiju zbog nižih zabilježenih temperatura. Može se uočiti sporiji trend porasta temperature.

### 5.2.3. Sile rezanja

Signali sila snimani su u tri osi ( $F_x$ ,  $F_y$  i  $F_z$ ) u ovisnosti o vremenu. Zbog lakše usporedbe rezultata s prethodnim istraživanjem [1] i ovdje je korišten isti način izračuna rezultantne sile  $F_R$ . Najprije su određene približno maksimalne vrijednosti sila  $F_x$ ,  $F_y$  i  $F_z$  iz srednjih vrijednosti 10 % najvećih vrijednosti sila razmatranog signala. Zatim se rezultantna sila izračunala iz tih maksimalnih vrijednosti prema sljedećoj formuli:

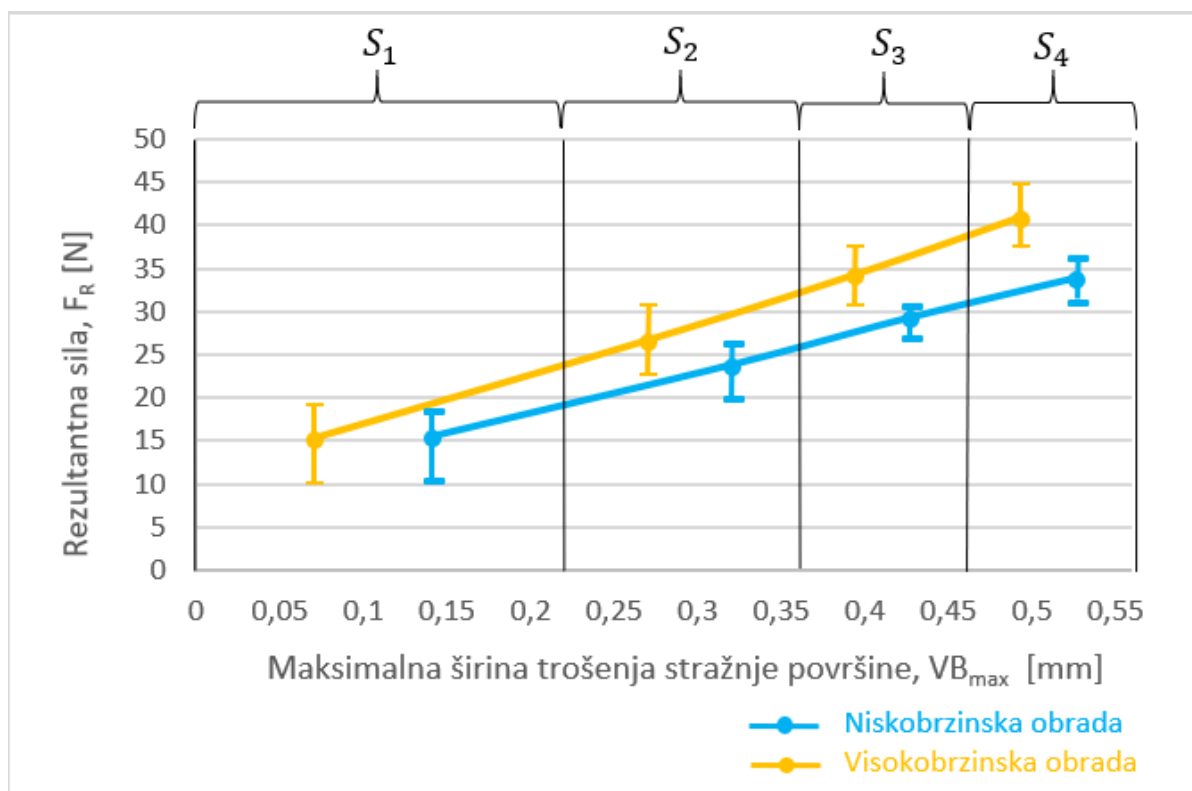
$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2.1)$$

Izračunom uprosječne maksimalne sile želio se izbjeći utjecaj sporadičnih pojava ekstremnih vrijednosti sila. Kako su vrijednosti radijalnih komponenti sila  $F_x$  i  $F_y$  daleko manje naspram komponente  $F_z$ , vrijednosti rezultantne sile  $F_R$  praktički se ne razlikuju od sile  $F_z$ . Od ukupnih 76 izračunatih rezultantnih sila, 38 pripada niskobrzinskoj obradi, a 38 visokobrzinskoj. Prema tablici 5.5 napravljene su kategorije rezultantnih sila prema stupnju istrošenosti alata. Za svaku kategoriju uzeta je maksimalna, minimalna i prosječna vrijednost svih maksimalnih rezultantnih sila (tablica 5.8).

**Tablica 5.8 Maksimalne, minimalne i prosječne vrijednosti maksimalnih rezultantnih sila podijeljene prema stupnju istrošenosti**

		Režim obrade	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
Rezultantna sila, $F_R$ [N]	Maksimalna vrijednost	Niskobrzinski	18,82	26,71	30,96	36,64
		Visokobrzinski	19,40	30,91	37,86	45,06
	Minimalna vrijednost	Niskobrzinski	10,75	20,14	27,28	31,45
		Visokobrzinski	10,33	22,85	31,02	37,80
	Prosijek svih vrijednosti	Niskobrzinski	15,51	23,82	29,25	33,86
		Visokobrzinski	15,33	26,69	34,20	40,89

Slika 5.8 prikazuje dijagram rezultantne sile u ovisnosti o maksimalnoj širini trošenja stražnje površine alata s podjelom prema stupnjevima istrošenosti alata. Gornje crtice predstavljaju maksimalne vrijednosti rezultantnih sila za svaki stupanj istrošenost, a donje crtice minimalne vrijednosti. Kroz srednje vrijednosti provučena je linija od prve kategorije istrošenosti alata do zadnje.



Slika 5.8 Dijagram rezultatna sila – maksimalna širina trošenja stražnje površine

Iz priloženog se može zaključiti da je sila rezanja veća kod visokobrzinske obrade u odnosu na niskobrzinsku obradu, no velikih razlika zapravo nema. Maksimalna izmjerena vrijednost sile iznosi oko 45 N te se javlja pri većoj brzini rezanja. Razlog povećanja sile rezanja povećanjem brzine rezanja najvjerojatnije je zbog sitnozrnate strukture ispitivanog materijala, kod kojeg je odvojena čestica praškasta. Povećanjem brzine rezanja povećava se i količina odvojene čestice u obliku praha koja se teško odvodi pa tijekom obrade dolazi do pojave većih sila.

## 6. ZAKLJUČAK

Tijekom bušenja kosti u traumatologiji i ortopediji dolazi do znatnog povišenja temperature kosti. Za to je odgovorno više čimbenika. Parametri obrade i stupanj istrošenosti medicinskog svrdla značajno utječu na sile rezanja i razvoj topline u zoni bušenja, što u konačnici može rezultirati s ozbiljnim i nepovratnim posljedicama na biomehaničke karakteristike kosti u području zahvata.

U ovom radu dan je kratak pregled istraživanja iz područja bušenja medicinskim svrdlom, izvršena je eksperimentalna analiza utjecaja visokobrzinske i niskobrzinske obrade na dinamiku trošenja medicinskog svrdla te je napravljen usporedbeni prikaz dva režima obrade uz pomoć signala sila rezanja i temperature dobivenih mjernim sensorima. Bušenjem ploče, koja je karakteristikama značajnim za provedeni pokus slična kostima, utvrđeni su trendovi temperature i sile rezanja s porastom istrošenosti oštrica svrdla s dvije različite kombinacije parametara obrade.

Usporedbom rezultata trošenja stražnje površine alata može se jednostavno zaključiti da je trošenje oštrice kod visokih brzina rezanja daleko veće od trošenja niskim brzinama. Što i nije iznenađujuće s obzirom na to da je brzina rezanja jedan od glavnih čimbenika koji utječe na trošenje alata. Usporedbom izmjerenih vrijednosti sila i temperatura dobivenih visoko i nisko brzinskim parametrima obrade, može se vidjeti da su kod visokobrzinskih parametara sile rezanja bile veće, a temperature niže. Stoga se može zaključiti da su visokobrzinski parametri obrade prikladniji za bušenje kostiju, uz uvjet da sile rezanja ne premaše vrijednosti koje su ostvarive ručnim bušenjem.

Imajući u vidu uočene trendove izmjerenih vrijednosti sila i temperatura, predlaže se provođenje novih pokusa primjenom većih brzina rezanja, odgovarajućeg rashladnog sredstva, kao i provođenje eksperimenta na pravim kostima.

## LITERATURA

- [1] Staroveški, T.: *Modeliranje trošenja medicinskog svrdla*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [2] Fernandes, M. G., Fonseca, E. M. M., Jorge, R. M., Vaz, M., Dias, M. I.: *Thermal analysis in drilling of ex vivo bovine bones*, Journal of Mechanics in Medicine and Biology, Vol. 17, Izdanje 5, 2017.
- [3] Biyikli, S., Modest, M. F., Tarr, R.: *Measurements of thermal properties for human femora*, Journal of Biomedical Materials Research, Vol. 20, Izdanje 9, 1986.
- [4] Alam, K., Imran, S. H., Al-Shabibi, A., Ghodsi, M., Silberschmidt, V.: *Experimental study on the effect of the drill quality on bone temperature in drilling*, Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications, Vol. 30, Izdanje 1, 2018.
- [5] Chen, Y.-C., Tu, Y.-K., Zhuang, J.-Y., Tsai, Y.-J., Yen, C.-Y., Hsiao, C.-K.: *Evaluation of the parameters affecting bone temperature during drilling using three-dimensional dynamic elastoplastic finite element model*, Medical & Biological Engineering & Computing Journal, Vol. 55, Izdanje 11, 1949-1957 str., 2017.
- [6] Davidson, S. R. H., James, D. F.: *Measurement of thermal conductivity of bovine cortical bone*, Medical Engineering & Physics, Vol. 22, Izdanje 10, 741-747 str., 2000.
- [7] Balder, D.: *Utjecaj parametara obrade na temperaturu kosti kod postupka bušenja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [8] *Hrvatska enciklopedija*, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=45773>, pristupljeno travanj 2018.
- [9] Shakouri, E., Sadeghi, M. H., Maerefat, M., Shajari, S.: *Experimental and analytical investigation of the thermal necrosis in high-speed drilling of bone*, Journal of Engineering in Medicine, Vol. 228, Izdanje 4, 330-341 str., 2014.
- [10] Abouzgia, M. B., Symington, J. M.: *Effect of drill speed on bone temperature*, International Journal of Oral & Maxillofacial Surgery, Vol. 25, 394-399 str., 1996.
- [11] Reingewirtz, Y., Szmukler-Moncler, S., Senger, B.: *Influence of different parameters on bone heating and drilling time in implantology*, Clinical Oral Implants Research, Vol. 8, 189-197 str., 1997.



- [12] Udiljak, T., Ciglar, D., Skorić, S.: *Investigation into bone drilling and thermal bone necrosis*, Advances in Production Engineering & Management Journal, Vol. 3, 103-112. str., 2007.
- [13] Udiljak, T.: *Postupci obrade piljenje, blanjanje i bušenje*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [14] Pavić, L.: *Utjecaj sterilizacije na intenzitet trošenja medicinskog svrdla*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [15] Augustin, G.: *Termičko oštećenje kosti tijekom bušenja dvostupnjevanim svrdlom i svrdlom s protočnim hlađenjem*, Medicinski fakultet, Zagreb, 2011.
- [16] Peček, M.: *Utjecaj geometrije svrdla i parametara obrade na trošenje oštrice pri bušenju kamena*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [17] Hršak, E.: *Trošenje alata pri bušenju kamena*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [18] Fernandes, M. G., Fonseca, E. M. M., Natal, R. M., Dias, M. I., Lopes, A. C., Ribeiro, J. E.: *Experimental study of temperatures during drilling of ex vivo bovine bones*, 10. Congresso Nacional de Mecânica Experimental, 2016.
- [19] Hein, C., Inceoglu, S., Juma, D., Zuckerman, L.: *Heat generation during bone drilling: A comparison between industrial and orthopaedic drill bits*, Journal of Orthopaedic Trauma, Vol. 31, Izdanje 2, 2017.
- [20] Shakouri, E., Hassanalideh, H. H., Gholampour, S.: *Experimental investigation of temperature rise in bone drilling with cooling: A comparison between modes of without cooling, internal gas cooling and external liquid cooling*, Journal of Engineering in Medicine, Vol. 232, Izdanje 1, 2017.
- [21] Staroveški, T., Brezak, D., Udiljak, T.: *Drill wear monitoring in cortical bone drilling*, Medical Engineering and Physics, Vol. 37, Izdanje 6, 560-566 str., 2015.
- [22] Li, X., Zhu, W., Wang, J., Deng, Y.: *Optimization of bone drilling process based on finite element analysis*, Applied Thermal Engineering Journal, Vol. 108, 211-220 str., 2016.
- [23] Feldmann, A., Gavaghan, K., Stebinger, M., Williamson, T., Weber, S., Zysset, P.: *Real-time prediction of temperature elevation during robotic bone drilling using the torque signal*, Annals of Biomedical Engineering Journal, Vol. 45, Izdanje 9, 2088-2097 str., 2017.
- [24] Sawbones Co., <https://www.sawbones.com/>, pristupljeno travanj 2018.

- 
- [25] Klaić, M., Staroveški, T., Udiljak, T., Čatlak, Z., Ehrenfreund, T.: *The influence of drill sterilization and drill guide modifications on the quality of bone drilling process*, Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2018, 723-726 str., 2018.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc